

Facts About. Lasertechnologie.

Linde Gas

Linde

Grundlagen der Lasertechnik.

Inhalt.

1. Einleitung	3	8. Strahlführung und -formung	16
2. Der Begriff „Laser“	4	8.1 Strahlführungssystem	16
3. Eigenschaften von Laserstrahlung	5	8.2 Lichtleitfaser	17
3.1 Monochromasie, Kohärenz und Divergenz	5	8.3 Bearbeitungskopf	18
3.2 Intensitätsverteilung und Modenordnung	5	8.4 Werkstückhandhabung	19
3.3 Qualitätsmerkmal der Laserstrahlung	6	9. Laserstrahl-Materialbearbeitung	20
3.4 Qualitätskennzahlen K und M ²	6	9.1 Das Laserstrahlschneiden	21
4. Erzeugung des Laserstrahls	7	9.2 Das Laserstrahlschweißen	22
5. Aufbau einer Laserstrahlquelle	8	9.3 Die Oberflächenbehandlung mit Lasern	22
5.1 Das laseraktive Medium	8	10. Die Laserstrahlverfahren im Wettbewerb mit anderen Verfahren	23
5.2 Der Resonator	8	10.1 Thermisches und mechanisches Trennen	23
5.3 Die Anregung	8	10.2 Schweißen	24
5.4 Die Kühlung	9	11. Sicherheitshinweise	25
5.5 Weitere Elemente und Aggregate	9	11.1 Laserstrahlung	25
6. Betriebsarten von Lasern	10	11.2 Elektrische Energieversorgung	25
7. Industrielle Laserstrahlquellen	11	11.3 Schneid- und Schweißemissionen	25
7.1 Der CO ₂ -Laser	12	11.4 Gase und Gasversorgung	25
7.2 Der YAG-Laser	14	12. Literatur	27
7.3 Der Faserlaser	15		
7.4 Der Excimer-Laser	15		

LASERLINE® ist eine registrierte Marke der Linde Gruppe.

Autoren

Joachim Berkmanns, Cleveland, USA

Mark Faerber, Unterschleißheim, Deutschland

1. Einleitung.



Laser sind aus dem täglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Jeder hat jeden Tag mit Lasertechnologien zu tun, sei es beim Telefonieren, Fernsehen oder Internetsurfen, wenn die Daten z.B. mit Laserdioden über Lichtleitfasern übertragen werden, sei es beim Einkaufen (Produktbeschriftungen und Scannerkassen) oder Autofahren. Dazu sind das Laserstrahlschneiden, -schweißen und -markieren bei der Fahrzeugproduktion zu nennen, aber auch Laserdioden als Anzeiger, in Scheinwerfern, in Ampeln usw. Die meisten der dabei eingesetzten Laser(dioden) sind nur von sehr geringer Leistung und lassen sich nicht für die Bearbeitung von Metallen einsetzen.

Aufbau und Wirkungsweise dieser Laser unterscheiden sich aber nicht grundsätzlich von den Lasern hoher Leistung, die in vielen Bereichen industrieller Fertigung zum Laserstrahlschneiden, -schweißen usw. angewendet werden. Die Laserstrahlleistung ist dabei so hoch, dass der Werkstoff spontan geschmolzen und sogar verdampft werden kann. Das Laserstrahlschneiden ist hier das mit Abstand am häufigsten eingesetzte Laserstrahlverfahren zum thermischen Trennen von Stählen, Edelstählen, Aluminium, Kupfer usw., aber auch

zum Schneiden von Nichtmetallen wie z.B. Kunststoffen, Holz, Papier, Textilien usw. Beim Schweißen hat die Lasertechnik zum Teil bestehende Verfahren ersetzt, aber auch gänzlich neue Möglichkeiten eröffnet wie z.B. das Schweißen von Tailored Blanks. Auch in der Oberflächenbehandlung, beim Härten, Beschriften usw. und auch beim Bohren spielt der Laser heutzutage eine entscheidende Rolle.

Mit diesem Facts About soll ein Einstieg in die Lasertechnologie ermöglicht werden. Dazu werden wesentliche physikalische Grundlagen des Prozesses der Strahlentstehung vereinfacht dargestellt und Aufbau und Wirkungsweise des Lasers erläutert. Bei der praktischen Anwendung des Lasers kommen vielfach technische Gase zur Anwendung, sei es als Lasergase zur Erzeugung der Laserstrahlung, sei es als Prozessgase, die den Schneid- oder Schweißprozess unterstützen. Die Spezifikation der Art und Reinheit dieser Gase beeinflusst die Wirtschaftlichkeit der Laseranlage zum Teil erheblich und sollte den Qualitätsanforderungen der jeweiligen Anwendung optimal gerecht werden. Dazu wird in diesem und weiteren Facts About (siehe Kapitel 12) Hilfestellung gegeben.

2. Der Begriff „Laser“.

Der Begriff „Laser“ ist ein Akronym für die aus dem Englischen stammende Beschreibung des Laserprozesses: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, also Lichtverstärkung durch stimulierte Aussenden von Strahlung. In anderen Worten: Ein Lichtstrahl wird verstärkt, indem ein geeignetes Medium zuerst durch Energiezufuhr angeregt und anschließend durch vorhandene Strahlung dazu stimuliert wird, selbst Strahlung abzugeben. Diese Strahlung liegt nicht immer im sichtbaren Bereich, und besonders die in der Materialbearbeitung eingesetzten Laserstrahlen im infraroten oder ultravioletten Bereich, sind also nicht sichtbar.

Bild 1: ungerichtetes Licht einer Glühlampe und gerichtetes, monochromatisches, kohärentes Laserlicht

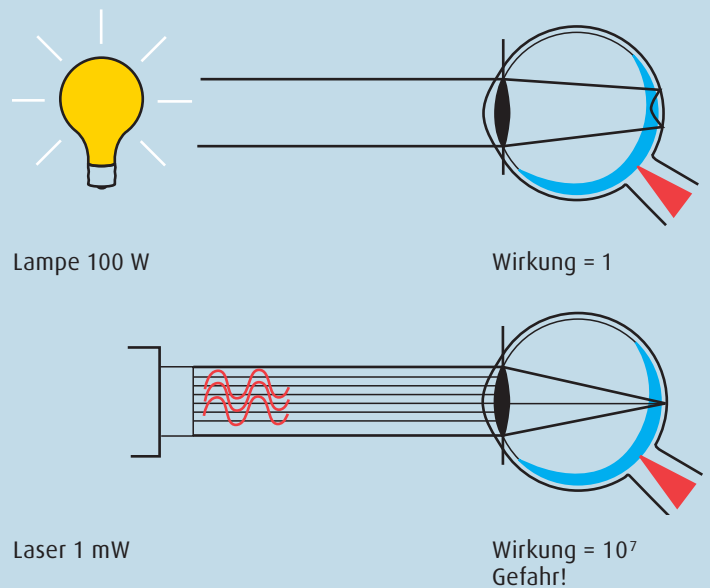
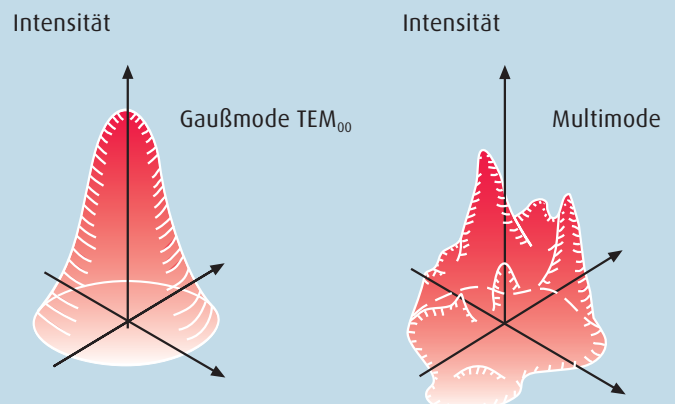


Bild 2: Intensitätsverteilung im Laserstrahl



3. Eigenschaften von Laserstrahlung.

Laser erzeugen Licht mit besonderen Eigenschaften, das sich als elektromagnetische Welle ausbreitet. Mit dieser vereinfachten Vorstellung lassen sich zahlreiche Phänomene wie die Interferenz von Lichtwellen verstehen. Die Energie führt die elektromagnetische Welle jedoch sozusagen in kleinen Portionen oder Kügelchen (Photonen) mit sich. Die Energie der Strahlung hängt dabei von der Frequenz ab entsprechend der Formel $E = h \cdot \nu$, die die Energie der einzelnen Lichtphotonen beschreibt. Diese Vorstellung des Energietransports mit Lichtphotonen ist wiederum hilfreich dabei, andere Phänomene des Lichts wie den photoelektrischen Effekt zu erläutern.

Die besonderen Eigenschaften des Laserlichts sind seine Monochromasie, die Kohärenz und die geringe Divergenz.

3.1 Monochromasie, Kohärenz und Divergenz

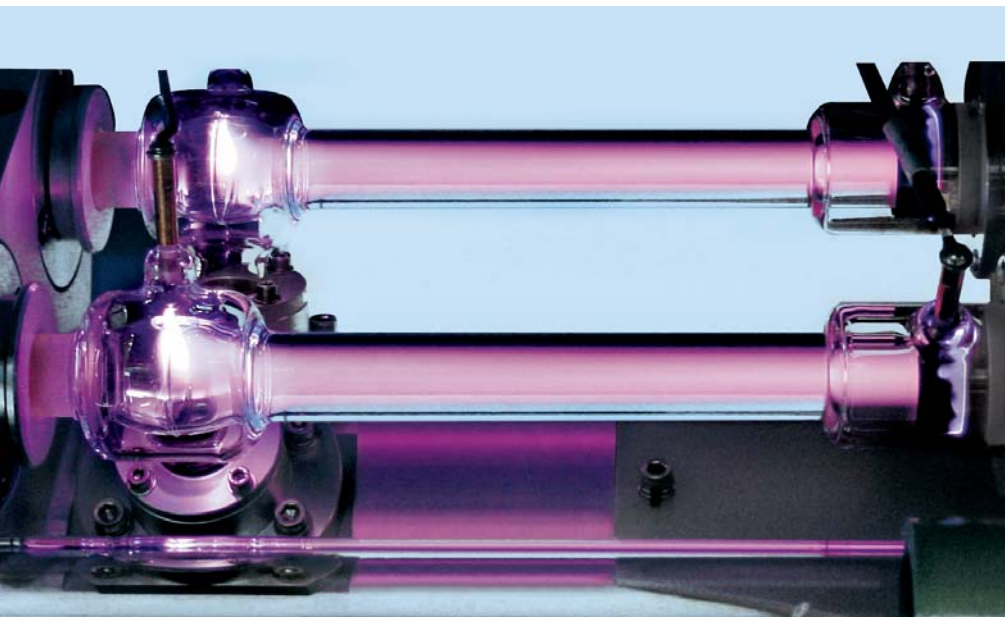
Natürliches Licht wie auch das Licht einer Glühlampe setzt sich aus Strahlung unterschiedlichster Wellenlängen zusammen, wie ein Regenbogen veranschaulicht. Die Ausbreitung des Lichts einer Glühlampe erfolgt in alle Richtungen, ist also ungerichtet, vgl. Bild 1.

Demzufolge ist die Lichtintensität an einem bestimmten Punkt sehr gering. Laserlicht besteht nur aus Strahlung einer einzigen Wellenlänge λ (Monochromasie), alle Wellen haben die gleiche Phasenlage (Kohärenz) und breiten sich annähernd parallel aus (geringe Divergenz). Die Intensität im Laserstrahl ist also auch in großer Entfernung sehr hoch. Deswegen ist eine Bündelung der Laserstrahlung in einem kleinen Brennfleck von zumeist weniger als 0,5 mm im Durchmesser auch in großem Abstand von der Strahlquelle von z. B. 20 m möglich und es kann eine Energiekonzentration erzielt werden, die zum Schmelzen und Verdampfen von Stahl ausreicht.

3.2 Intensitätsverteilung und Modenordnung

Die Verteilung der Strahlleistung bzw. Strahlintensität im Laserstrahl hängt von vielen Faktoren ab wie dem Aufbau des Resonators, den verwendeten Optiken und Blenden usw. und wird durch die so genannte Modenordnung beschrieben.

Eine ideale Intensitätsverteilung wäre gaußförmig, mit der höchsten Intensität in der Strahlmitte und mit zu den Rändern hin abfallender Intensität, vgl. Bild 2. Diese Modenordnung bzw. Intensitätsverteilung wird mit TEM_{00} (Transversaler Elektromagnetischer Mode der Ordnung 0) bezeichnet und Grund- oder Gaußmode genannt. Beim Laserstrahlschneiden ist dieser Mode wegen der Unabhängigkeit von der Schneidrichtung und der Energiekonzentration in der Mitte besonders geeignet, bei anderen Anwendungen kann jedoch auch eine andere Energieverteilung im Strahl von Vorteil sein.



3.3 Qualitätsmerkmal der Laserstrahlung

Wie eben beschrieben wäre die ideale Energieverteilung im Strahl gaußförmig, wenn die Laserstrahlung im Grundmode TEM_{00} schwingt. Dies ist jedoch als „Momentaufnahme“ zeitlichen Änderungen unterworfen und nur ein Kriterium für die Strahlqualität.

Ein weiteres Kriterium ist die Divergenz der Laserstrahlung, die zwar sehr gering, aber doch vorhanden ist. Der Laserstrahl weitet sich also abhängig von Bauart und Leistung mit zunehmender Entfernung vom Laser auf. Bei Bearbeitungsanlagen mit langen Strahlwegen werden deswegen oft Teleskope in den Strahlengang eingesetzt, die an jeder Stelle des Bearbeitungstisches annähernd gleiche Strahlparameter gewährleisten und somit konstantere Prozessergebnisse ermöglichen.

Das Qualitätsmerkmal für die Strahlqualität, das die Divergenz der Strahlung, aber auch den Durchmesser des Strahls berücksichtigt, ist das Strahlparameterprodukt als Produkt aus Strahlradius und Strahldivergenz. Generell gilt: Je größer die Leistung des Lasers, desto größer ist das Strahlparameterprodukt und desto schlechter ist dementsprechend die Strahlqualität. Typische Werte für Schneid-laser in der Metallbearbeitung liegen zwischen 3 und 30 mm · mrad.

3.4 Qualitätskennzahlen K und M^2

Beim Laserstrahlschneiden hat die Güte der Laserstrahlung unmittelbar Einfluss auf die erzielbare Schnittqualität und Produktivität. Unterschiedliche Schneidlaser lassen sich über die Qualitätskennzahl K oder M^2 vergleichsweise einfach gegenüberstellen (M^2 ist im angelsächsischen Sprachraum gebräuchlich, $K = 1/M^2$). K beschreibt die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung in einem kleinen Brennfleck entsprechend

$$K = \frac{4 \lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \cdot \frac{1}{d_f}$$

λ ist die Wellenlänge des Laserlichts, π eine Konstante, f die Brennweite der Linse, D bezeichnet den Durchmesser des Rohstrahls und d_f den Durchmesser des Fokus, vgl. Bild 3.

K wird somit wesentlich durch D und d_f bestimmt, also durch den Durchmesser des unfokussierten Laserstrahls und den des fokussierten Strahls. Damit wird auch die Divergenz der Strahlung erfasst.

$K = 1$ für einen idealen Gaußstrahl und $K < 1$ für reale Laserstrahlung.

Multi-kW-CO₂-Laser zum Laserstrahlschneiden weisen zumeist einen K-Faktor von 0,5–0,8 auf. Nd:YAG-Laser haben in diesem Leistungsbereich in der Regel eine schlechtere Strahlqualität als CO₂-Laser.

4. Erzeugung des Laserstrahls.

Bild 3: Fokussierbarkeit von Laserstrahlung

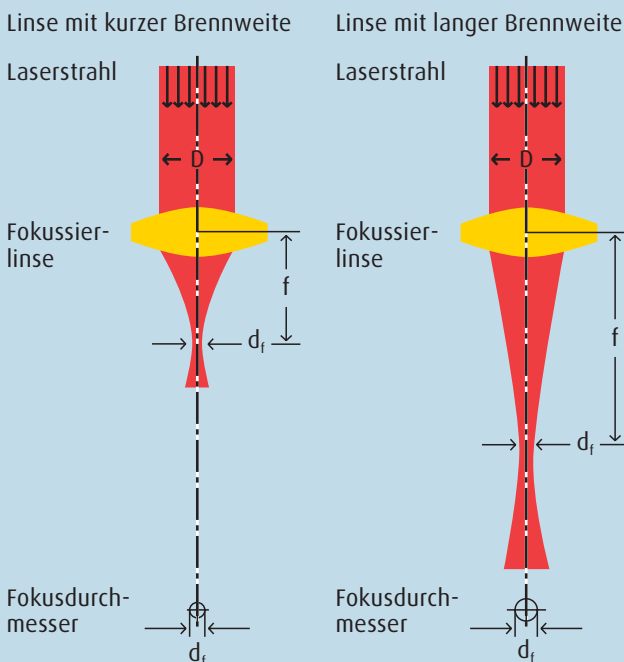
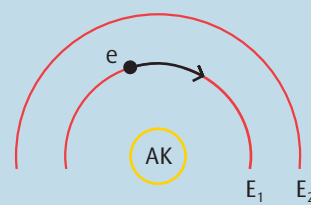
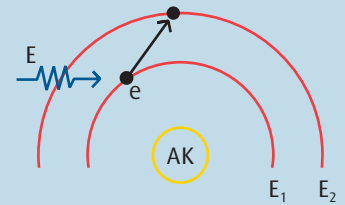


Bild 4: Atommodell, Anregung, spontane Emission, stimulierte Emission

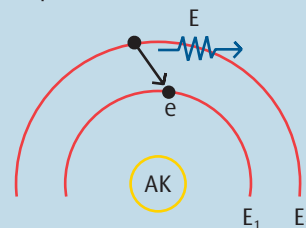
4a: Atommodell



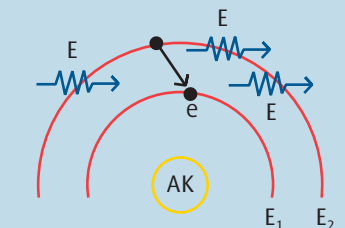
4b: Anregung



4c: spontane Emission $T \approx 10^{-8} \text{ s}$



4d: stimulierte Emission $T \ll 10^{-8} \text{ s}$



AK: Atomkern, e: Elektron, E: Energie, E_1 und E_2 : Energieniveaus

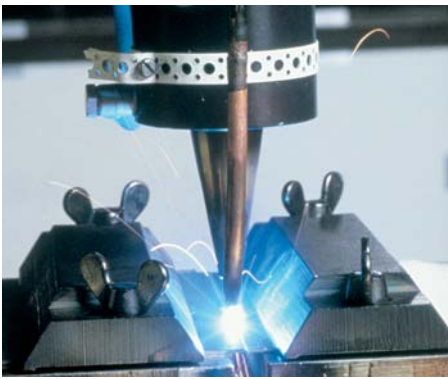
Für die Erzeugung eines Laserstrahls bedarf es erst einmal eines laseraktiven Mediums, das gasförmig, fest oder auch flüssig sein kann. Dieses Medium besteht aus Atomen mit Atomkern und umgebenden Elektronen, siehe Bild 4a. Wird dem Medium Energie (E) zugeführt, nehmen dessen Atome oder Moleküle einen Zustand höherer Energie an, sie werden „angeregt“. Dabei werden ihre Elektronen durch die zugeführte Energie in ein höheres Energieniveau überführt ($E_1 \rightarrow E_2$), vgl. Bild 4b, Moleküle beginnen infolge der Energiezufuhr zu schwingen. Dieser so genannte angeregte Zustand ist aber nicht stabil und die angeregten Teilchen wollen wieder zurück auf ihren angestammten Platz (niedrigstes Energieniveau). Sie tun dies nach charakteristischen

Verweilzeiten in E_2 von 10^{-7} – 10^{-8} s und geben die gespeicherte Energie in Form von Wärme, Stoßenergie oder in Form von Licht wieder ab ($E_2 \rightarrow E_1$), vgl. Bild 4c. Diesen Vorgang nennt man spontane Emission.

Die grundlegende Voraussetzung für die Funktionsfähigkeit des Lasers wurde von Einstein erkannt: Die Emission kann gezielt eingeleitet, also induziert oder stimuliert werden, bevor die charakteristische Verweilzeit erreicht ist. Dazu müssen allerdings bereits angeregte Atome oder Moleküle von Strahlung getroffen werden. Diese Strahlungsenergie wird jedoch nicht zusätzlich aufgenommen, sondern stimuliert die angeregten Atome/Moleküle, ihre gespeicherte

Energie abzugeben. Die dabei produzierte Strahlung weist die gleiche Ausbreitungsrichtung auf wie die einfallende Strahlung, vgl. Bild 4d. Bei spontaner Emission erfolgt die Strahlungsabgabe demgegenüber ungerichtet. Dieser Vorgang der stimulierten Emission bewirkt also eine Verstärkung der einfallenden Strahlung. Sind genügend angeregte Atome/Moleküle vorhanden und wird ständig durch Energiezufuhr Nachschub erzeugt, kann die stimulierte Emission zu einer lawinenartigen Verstärkung dieser Strahlung führen. Die erzeugte Strahlung zeichnet sich durch gleiche Wellenlänge, gleiche Phasenlage und gleiche Ausbreitungsrichtung aus.

5. Aufbau einer Laserstrahlquelle.



Folgende Komponenten sind Teil einer Laserstrahlquelle: laseraktives Medium, Resonator, Anregung und Kühlung.

5.1 Das laseraktive Medium

Medien geben die gespeicherte Energie bei der Emission in unterschiedlicher Form wieder ab. Laseraktive Medien sind Stoffe, die einen Teil der Emissionsenergie in Form von Laserstrahlung aussenden. Für die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung sind dies hauptsächlich Kohlendioxid im CO₂-Gaslaser und eine Fluor- oder Chlor-Halogen-Verbindung im Excimer-Gaslaser. Bei den Festkörperlaser ist das laseraktive Medium ein Feststoff, z. B. ein Yttrium-Aluminium-Granat (Kristall), angereichert mit Neodym bzw. mit Ytterbium beim Nd:YAG- und Yt:YAG-Laser. Der Diodenlaser besteht aus einer Vielzahl von Laserdioden, die durch Zufuhr von elektrischer Energie in einen Halbleiter angeregt werden. Ein weiterer Festkörperlaser ist der noch junge Faserlaser. Bei diesem wird ein Element der Gruppe „Seltene Erden“, z. B. Ytterbium, als laseraktives Medium in die Mitte eines optischen Lichtleiters eingebettet.

Nicht vergessen sollte man auch den Helium-Neon-Laser, einen Gaslaser mit nur geringer Leistung. Dieser strahlt jedoch im Gegensatz zu den anderen genannten Lasern im sichtbaren Spektrum. Er kann in den Strahlengang des Bearbeitungslasers geschaltet werden und erleichtert somit das Einrichten einer Lasermaschine. Neuere Laser haben eine Laserdiode anstelle des Helium-Neon-Lasers. Diese so genannten Hilfs laser sind in jedem Fall nur sichtbar, wenn der Bearbeitungslaser sicher abgeblockt ist.

5.2 Der Resonator

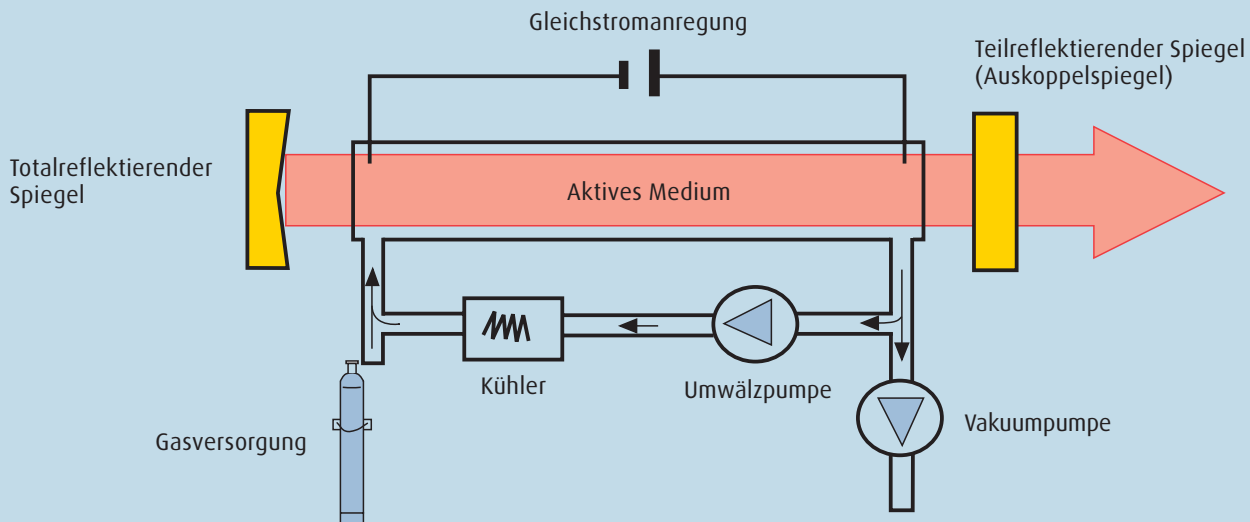
Die Komponenten, die zur Erzeugung der Laserstrahlung benötigt werden, sind im Resonator enthalten. Im einfachsten Fall ist der Resonator aus 2 Spiegeln aufgebaut, zwischen denen die Laserstrahlung hin und her reflektiert wird, vgl. Bild 5. Einer der Spiegel ist vollständig reflektierend, der andere ein teildurchlässiger Spiegel, über den die nutzbare Laserstrahlung ausgekoppelt wird. Spiegelgeometrie, Resonatordurchmesser und Resonatorlänge müssen aufeinander abgestimmt sein, um eine hohe Strahlleistung bei guter

Strahlqualität zu erzielen. Bei hohen Strahlleistungen und entsprechend großen Resonatorlängen wird der Resonator mehrfach gefaltet, z. B. in Form eines Dreiecks oder Vierecks.

5.3 Die Anregung

Zur Anregung des laseraktiven Mediums werden unterschiedliche Energieformen, z. B. elektrische Energie, Lichtquanten, chemische Reaktionen usw., eingesetzt. Bei CO₂-Gaslasern wird die Energie mittels Gleichstrom über Elektroden direkt in das laseraktive Medium eingespeist oder durch Hochfrequenzanregung kapazitiv über die Resonatorwandung übertragen.

Bei der Gleichstromanregung (DC = Direct Current) kommt es zu einer Gasentladung, wenn zwischen den Elektroden eine Gleichspannung von einigen kV angelegt wird, siehe Bild 5. Allerdings werden die Elektroden dabei stark belastet und können punktuell erodieren (Elektrodenabbrand). Die Pulsbarkeit ist eingeschränkt auf eine Frequenz von max. etwa 1 kHz, dafür ist Superpulsbetrieb möglich (siehe Kapitel 6: Betriebsarten von Lasern).

Bild 5: prinzipieller Aufbau eines Resonators (Beispiel: CO₂-Laser)

Die Hochfrequenzanregung (engl. RF = Radio Frequency) im Bereich von einigen Megahertz erfolgt berührungslos durch elektromagnetische Felder, die von Elektroden, die außerhalb des Resonators platziert sind, erzeugt werden. Die Atome und Moleküle im Resonator versuchen der sich ändernden Polarität der Felder zu folgen, erwärmen sich dabei, kollidieren miteinander und werden schlussendlich angeregt. Elektrodenabbrand ist damit ausgeschlossen und eine gute Pulsbarkeit gegeben. Allerdings sind die Investitionskosten für diese Anregungsart höher.

Bei den Festkörperlaser erfolgt die Anregung über Blitzlampen oder Laserdioden bzw. elektrische Energie bei den Diodenlasern.

5.4 Die Kühlung

Da nur ein geringer Teil der aufgewendeten Energie tatsächlich in Laserstrahlung umgesetzt wird, ist eine gute Kühlung des Lasermediums wichtig. Der größere Teil der Energie muss in

Form von Wärme wieder abgeführt werden, da die Wärme den Entstehungsprozess der Laserstrahlung stört. Bei den CO₂-Lasern erfolgt die Kühlung des laseraktiven Mediums durch Zirkulation des Lasergases, das dabei durch einen Wärmetauscher geleitet wird, vgl. Bild 5. Eine andere Möglichkeit der Kühlung ist die Wärmeableitung durch die Resonatorwandung ohne Zirkulation des Lasergases (Diffusionskühlung); die Energiemenge, die auf diese Weise abgeführt werden kann, ist jedoch begrenzt.

Bei den Nd:YAG-Lasern kann der Laserkristall nur von außen gekühlt werden, was ebenfalls die Wärmeableitung einschränkt und die maximale Laserleistung begrenzt. Der Yt:YAG-Kristall eines Scheibenlasers ist demgegenüber direkt auf einem Wärmetauscher montiert, sodass höhere Laserleistungen umgesetzt werden können und wegen der direkten Kühlung eine bessere Strahlqualität erzielt werden kann als mit dem Nd:YAG-Laser.

Die Dioden des Diodenlasers sind ebenfalls direkt auf einem Wärmetauscher montiert, sodass eine gute Kühlung gewährleistet werden kann.

Der Faserlaser ist aus einer Vielzahl von Laserfasern zusammengesetzt, die jeweils nur eine relativ geringe Leistung umsetzen. Zudem beträgt der Wirkungsgrad dieses Lasers fast 50 %, sodass insgesamt weniger Verlustwärme produziert wird als bei den anderen Systemen. Dementsprechend kann bei Leistungen bis zu einigen kW auf eine aufwendige Wasserkühlung verzichtet werden.

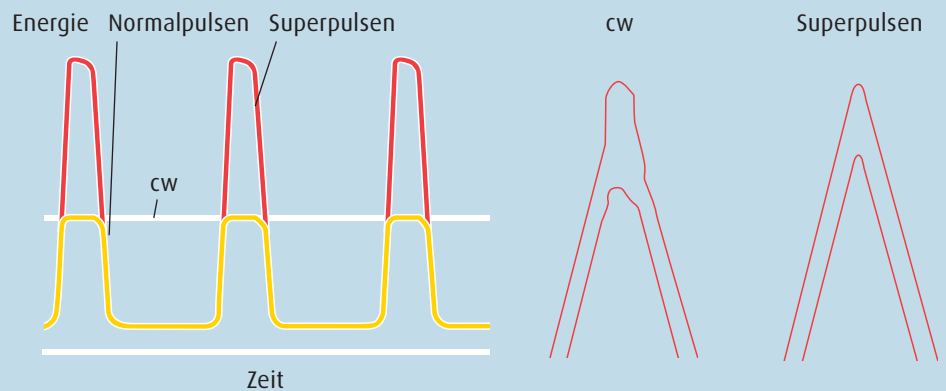
5.5 Weitere Elemente und Aggregate

Auf weitere zum Betrieb des Lasers notwendige Aggregate und Elemente, wie z. B. die benötigte Steuerung, soll hier nicht eingegangen werden, da diese zumeist sehr anlagenspezifisch sind.

6. Betriebsarten von Lasern.

Bild 6: cw-Betrieb, Pulsen und Superpulsen

Bild 7: Vorteile des Pulsens beim Schneiden spitzer Ecken



Lasern werden kontinuierlich oder gepulst betrieben. Bei kontinuierlichem oder cw-Betrieb (cw = continuous wave) wird ständig eine gleichbleibend hohe Laserstrahlleistung bereitgestellt, vgl. Bild 6. Die Höhe der Leistungsabgabe ist einstellbar. In der Praxis bedeutet das, dass im Resonator kontinuierlich ein Laserstrahl erzeugt wird, der zwischen den Resonatorspiegeln hin und her reflektiert. Ein Teil dieser Strahlung wird über den teildurchlässigen Spiegel kontinuierlich ausgekoppelt.

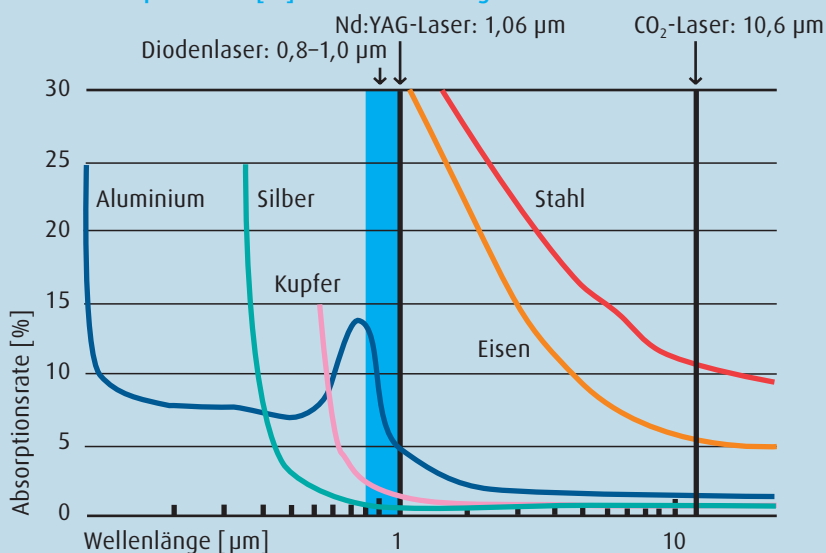
In Bearbeitungspausen wird der Resonator entweder ausgeschaltet oder bei geringer Leistung betrieben. Die geringe Leistung wird mit eingebauten Strahlfallen weggekühlt. Die optischen Elemente im Laser werden dabei weniger stark belastet als bei den schnellen Aufheiz- und Abkühlzyklen, die mit dem Abschalten verbunden wären. Für die Materialbearbeitung wird die Leistung entsprechend der Aufgabe wieder erhöht.

Beim Normalpuls-Betrieb wird der Laser, vereinfacht ausgedrückt, sehr schnell ein- und ausgeschaltet, vgl. Bild 6. Übliche Pulsfrequenzen liegen zwischen 100 Hz und 10 kHz. Durch das Pulsen kann die in das Werkstück eingebrachte Energie reduziert werden. So lässt sich z. B. beim Schneiden die eingebrachte Energie an die Vorschubgeschwindigkeit und den Konturverlauf anpassen, sodass beispielsweise spitze Ecken und schmale Stege nicht überhitzen und unkontrolliert verbrennen,

vgl. Bild 7. Das Pulsen wird auch oft beim Einstechen angewendet. Die Pulsspitzenleistung entspricht beim „normalen“ Pulsen etwa der cw-Leistung des Lasers. Beim Superpulsen kann die Spitzenleistung ein Vielfaches der cw-Leistung betragen, vgl. Bild 6. Der Laser muss jedoch konstruktiv für den Superpuls-Betrieb ausgelegt sein, d. h., Superpulsen lässt sich nur mit speziellen Resonatoren erreichen. Diese können z. B. als Oszillator-Verstärker betrieben werden. Hierbei wird im Oszillator-Teil ein Laserstrahl von hoher Güte, aber geringer Leistung erzeugt, der im Verstärker mit angeregtem Medium um ein Vielfaches verstärkt wird. Durch das Superpulsen kann die thermische Belastung des Werkstücks weiter reduziert werden. Im Puls- und besonders im Superpuls-Betrieb lässt sich eine hervorragende Schnittqualität erzielen, die erreichbare Schneidgeschwindigkeit ist jedoch aufgrund der niedrigen mittleren Leistung sehr gering.

7. Industrielle Laserstrahlquellen.

Bild 8: Absorptionsrate [%] für Laserstrahlung in kaltem Metall



Die Produktivität eines Laserstrahlprozesses wird wesentlich von der Laserstrahlleistung bestimmt. Aber auch die Qualität der bereitgestellten Laserstrahlung ist von Bedeutung für die Fertigungsqualität besonders beim Feinschneiden und Bohren. Ein weiterer Aspekt ist die Absorptionsrate des zu bearbeitenden Materials für die eingesetzte Laserstrahlung und deren Wellenlänge.

CO₂-Laserstrahlung wird von metallischen Werkstoffen vergleichsweise schlecht absorbiert, ein großer Teil der Laserstrahlung vom kalten Werkstoff also erst einmal wieder reflektiert, vgl. Bild 8, siehe Sicherheitshinweise im Kapitel 11.

Die Strahlung von Dioden- und Festkörperlaser wird demgegenüber vom kalten Metall besser absorbiert. Mit steigender Temperatur des Werkstoffs verbessert sich die Absorptionsrate jedoch für alle Laser deutlich bis zu nahezu vollständiger Einkopplung der gesamten Laserstrahlleistung bei Schmelztemperatur des Werkstoffs.

Die Absorption der Laserstrahlung in unterschiedlichen Werkstoffen hängt mit der Wellenlänge des Laserlichts zusammen. So lassen sich unterschiedliche Werkstoffe mit verschiedenen Lasern unterschiedlich gut bearbeiten. Die CO₂-Laserstrahlung wird beispiels-

weise von Stählen, Kunststoffen und Sperrholz relativ gut, von Leichtmetallen mäßig absorbiert. Nd:YAG-Laserstrahlung wird sehr gut von Stählen, gut von Leicht- und Buntmetallen, aber kaum von Kunststoffen oder Sperrholz absorbiert, siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Schneidbarkeit unterschiedlicher Werkstoffe mit Nd:YAG- und CO₂-Laserstrahlung

Zu schneidender Werkstoff	Wellenlänge (Mikrometer)	
	Nd:YAG-Laser: 1,06	CO ₂ -Laser: 10,6
Baustahl	sehr gut	sehr gut
Edelstahl	sehr gut	sehr gut
Aluminium	gut	gut
Kupfer	gut	schwierig
Gold	gut	nicht möglich
Titan	gut	gut
Keramik	schwierig	gut
Acrylglas	schlecht	sehr gut
Polyethen	schlecht	sehr gut
Polycarbonat	schlecht	gut
Sperrholz	schlecht	sehr gut

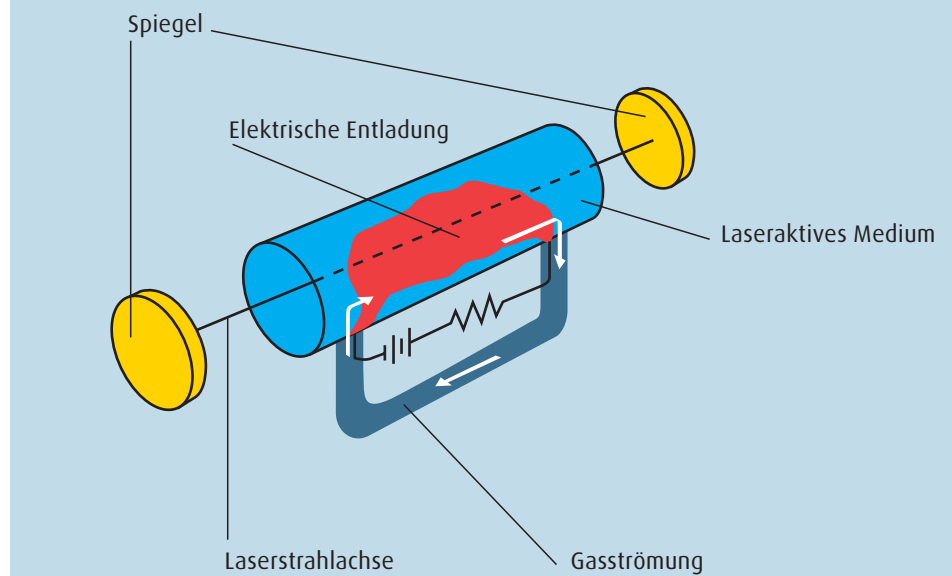
7.1 Der CO₂-Laser

Kohlendioxid ist, wie der Name andeutet, die laseraktive Komponente im Lasergasgemisch des CO₂-Lasers, das zudem noch Helium und Stickstoff als weitere Hauptkomponenten enthält. Einige CO₂-Laser benötigen neben diesen Hauptkomponenten Beimengungen von Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlenmonoxid und/oder Xenon, die die physikalischen und chemischen Vorgänge bei der Strahlerzeugung unterstützen. Die Lasergase müssen hohen Reinheitsanforderungen gerecht werden. Bereits geringe Mengen von Verunreinigungen wie z. B. Feuchtigkeit und Kohlenwasserstoffverbindungen stören die Strahlerzeugung, verursachen Leistungseinbußen und mindern die Strahlqualität.

Das Lasergasgemisch wird in einem geschlossenen Behälter zwischen den Resonatorspiegeln platziert. Dies kann ein Rohrsystem sein, in dem das Lasergasgemisch durch den Resonator und den Wärmetauscher geführt wird, vgl. Bild 5. Bei den Rohrsystemen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, das Laser gas zu führen: in Laserstrahlrichtung (längsgeströmt) oder quer dazu (quergeströmt) sowie mit hohem Gasumsatz oder mit niedrigem. Jedes dieser Systeme hat spezifische Vor- und Nachteile. Der geschlossene Behälter kann auch eine flache, längliche Form aufweisen, deren Wandungen als Wärmetauscher fungieren und eine Zirkulation des Lasergasgemischs unnötig machen (diffusionsgekühlter Laser).

Frisches Lasergasgemisch wird bei den genannten Systemen kontinuierlich zugegeben, um Verluste, eine Änderung der Zusammensetzung und zunehmende Verschmutzung auszugleichen. Darüber hinaus wird bei verschiedenen Lasern der Resonator beim Abschalten mit Stickstoff geflutet bzw. bei Inbetriebnahme mit Stickstoff gespült.

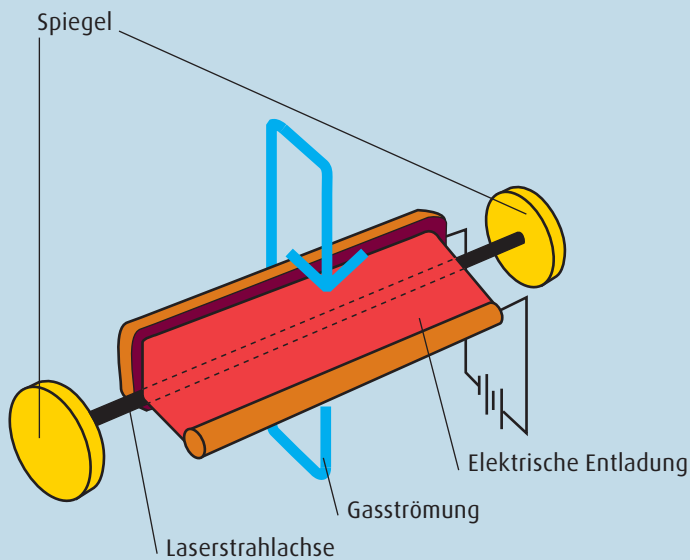
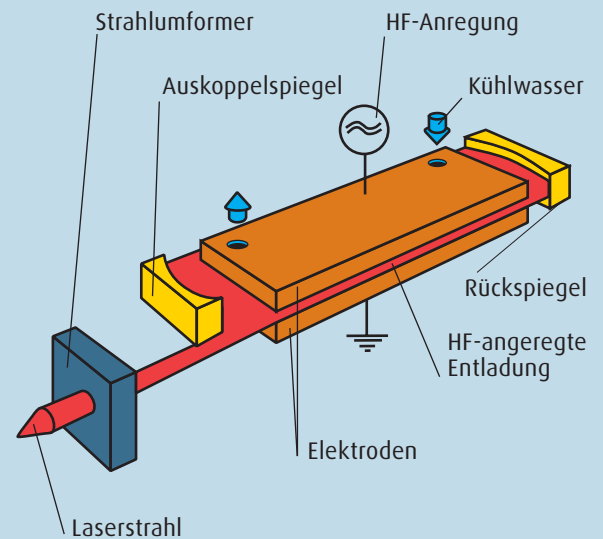
Bild 9: schnell längsgeströmter CO₂-Laser



Längsgeströmte CO₂-Laser

Bei dieser Bauart strömt das Lasergasgemisch in Richtung des Laserstrahls im Resonator, vgl. Bild 9. Langsam geströmte Laser weisen eine Gasströmungsgeschwindigkeit von ca. 5 m/s auf und sind meist gleichstromangeregt. Die Kühlung erfolgt in der Regel über die Resonatorwandung, sodass sich je Meter Resonatorlänge nur wenige 100 W Laserstrahlleistung erzeugen lassen. Hohe Laserstrahlleistungen erfordern demzufolge große Resonatorlängen, und die Resonatoren werden für einen kompakten Aufbau gefaltet. Der langsam geströmte Laser bietet eine hohe Strahlqualität bis zu Laserstrahlleistungen im 1-kW-Bereich. Einsatzbereiche dieses Lasers sind z. B. Präzisionsschneiden und -bohren.

Das Problem der Wärmeableitung wurde durch den schnell längsgeströmten Laser überwunden, bei dem das Lasergasgemisch, durch Rootspumpen oder Turbinen angetrieben, mit über 500 m/s zirkuliert und durch einen Wärmetauscher gekühlt wird, vgl. Bild 5 und Bild 9. Somit lassen sich sehr kompakte Laser hoher Ausgangsleistung von über 20 kW bauen. Die Anregung erfolgt mittels Gleichstrom oder Hochfrequenz-Energieübertragung. Die meisten der heute zur Materialbearbeitung eingesetzten Laser arbeiten nach diesem Prinzip.

Bild 10: quergeströmter CO₂-LaserBild 11: diffusionsgekühlter CO₂-Laser

Quergeströmte CO₂-Laser

Noch größere Kühlleistungen lassen sich erzielen, wenn das Lasergasgemisch quer zur Laserstrahlachse ausgetauscht wird wie beim quergeströmten Laser, vgl. Bild 10. Die Umwälzung erfolgt mittels Gebläse und das Lasergasgemisch wird durch einen Wärmetauscher gekühlt.

Durch das große Resonatorvolumen lassen sich hohe Laserstrahlleistungen von bis zu ca. 50 kW realisieren. Laser dieser Bauart sind üblicherweise gleichstromangeregt. Die Strahlqualität ist wegen des Temperaturgradienten senkrecht zur Strahlachse schlechter als bei längsgeströmten Lasern und nicht ausreichend für das Laserstrahlschneiden. Für das Schweißen und besonders die Oberflächenbehandlung ist diese Laserbauart jedoch geeignet.

Diffusionsgekühlte CO₂-Laser

Beim diffusionsgekühlten Laser bilden die Spiegel und die Elektroden die Begrenzung des gasgefüllten Resonators. Die Energiezufuhr erfolgt über eine Hochfrequenz-Gasentladung. Die Elektroden fungieren zusätzlich noch als Wärmetauscherplatten, vgl. Bild 11. Eine Strömung des Lasergasgemischs im Resonator wird nur durch Temperaturdifferenz gesteuert, die Kühlung erfolgt konvektiv über die Wärmetauscherplatten. Infolge der fehlenden Zirkulation, der Gasumwälzung, externer Wärmetauscher etc. baut dieser Laser sehr kompakt. Laserleistungen von bis zu ca. 8 kW werden heutzutage bei sehr guter Strahlqualität erzielt.

Eine neuere Entwicklung in diesem Bereich basiert auf Entladungsröhren, deren Wänden für die konvektive Kühlung eingesetzt werden. Diese Laser sind bei hoher Strahlqualität vergleichbar kompakt.

TEA-Laser

TEA steht für Transversely Excited Atmospheric Pressure. Der TEA-Laser ist ebenfalls ein CO₂-Laser, wird aber nicht bei dem niedrigen Druck betrieben, den die anderen CO₂-Laser aufweisen, sondern bei etwa Umgebungsdruck. Der Laser wird immer gepulst betrieben. Das Lasergasgemisch wird konvektiv gekühlt und die Gasmischung nur wenige Male im Jahr ausgetauscht. Dieser Laser produziert wenige 100 W und wird hauptsächlich zum Markieren z. B. von Herstellungs- und Verfallsdaten eingesetzt.

Bild 12: Nd:YAG-Laser, Anregung: Blitzlampen

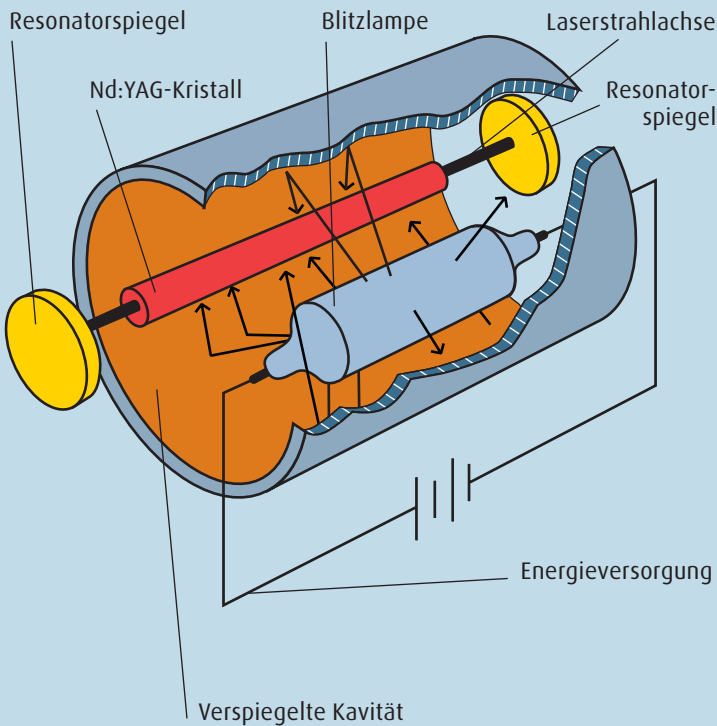
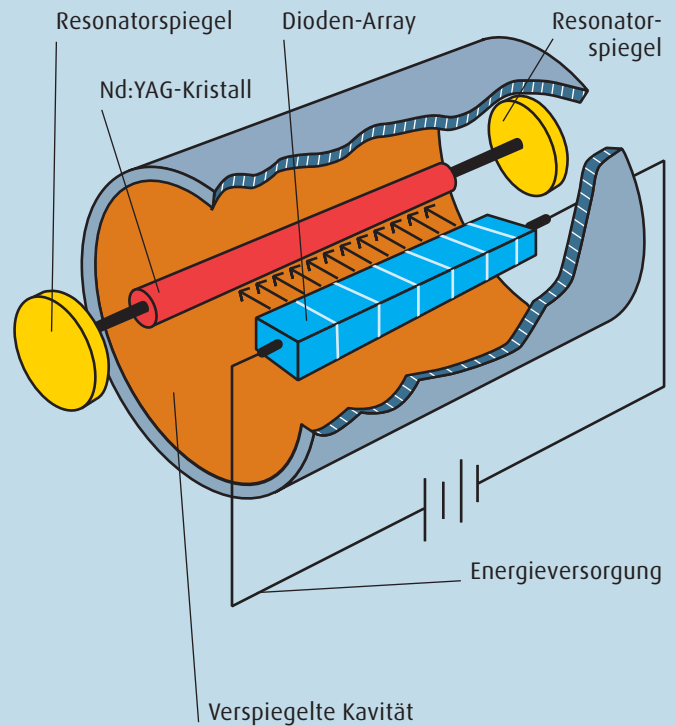


Bild 13: Nd:YAG-Laser, Anregung: Diodenbarren



7.2 Der YAG-Laser

Das laseraktive Medium des YAG-Lasers ist ein künstlich gezogener YAG-Einkristall (Yttrium-Aluminium-Granat), in den Neodym (Nd:YAG) oder Ytterbium (Yt:YAG) eingebettet ist. Der YAG-Laser ist demzufolge ein Festkörperlaser, der kein Gas benötigt, um die Laserstrahlung zu generieren. Die Kristalle werden durch Lichtenergie von Blitzlampen oder durch Strahlung von Laserdioden angeregt.

Nd:YAG-Laser

Die Laserkristalle sind stabförmig ausgeführt. Ein oder mehrere Laserstäbe werden in einem Resonator zwischen zwei Spiegeln platziert. Die Anregung erfolgt über Blitzlampen, siehe Bild 12, oder Diodenbarren, siehe Bild 13. Jeder Kristall bzw. Laserstab produziert eine Strahlleistung von maximal ca. 500 W (Blitzlampenanregung) bzw. 750 W (Diodenanregung). Die Verlustwärme wird mittels einer Wasserkühlung über die Außenseite der Kavität abgeführt. Bei hohen Leistungen treten jedoch Wärmespannungen in den Kristallen auf, die Auswirkungen auf die Strahlqualität haben und die Leistung begrenzen.

Die Blitzlampen haben eine begrenzte Lebensdauer, die je nach Anwendung wenige 100 Stunden bis zu über 1.000 Stunden betragen kann. Hohe Laserstrahlleistungen und kurze Einschaltzeiten tragen wesentlich zur Alterung der Blitzlampen bei. Diodenbarren enthalten eine Vielzahl von Laserdioden geringer Leistung, die mit deutlich über 10.000 Stunden eine wesentlich längere Lebensdauer aufweisen als Blitzlampen, aber auch eine höhere Investition erfordern. Der Wirkungsgrad diodenangeregter Laser ist höher als der lampenangeregter und die Strahlqualität bei hohen Leistungen besser.

Yt:YAG-Laser (Scheibenlaser)

Der Laserkristall weist die Form einer dünnen Scheibe auf und ist auf einem Wärmetauscher montiert. Dadurch wird eine effektive und gleichmäßige Kühlung gewährleistet und Wärmespannungen werden weitgehend vermieden. Ein Yt:YAG-Kristall emittiert Laserstrahlung von deutlich mehr als 1 kW und die Laserstrahlung zeichnet sich durch eine höhere Strahlqualität als Nd:YAG-Laserstrahlung aus. Yt:YAG-Laser werden durch Diodenlaserstrahlung angeregt, die mehrfach in Richtung des Kristalls gespiegelt wird. Auch hier findet sich der typische Resonatoraufbau wieder: Der Kühlkörper hinter dem Kristall stellt den Totalreflektor dar, der Auskoppelspiegel lässt einen Teil der Strahlung zur Bearbeitung durch, vgl. Bild 14. Für eine Erhöhung der Leistung werden die Strahlen mehrerer Laser über optische Elemente in einem gemeinsamen Strahlengang gebündelt.

Bild 14: Yt:YAG-Laser (Scheibenlaser)

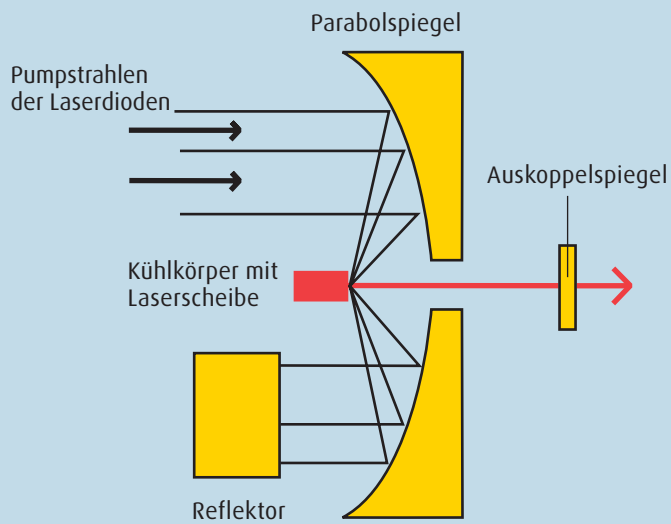
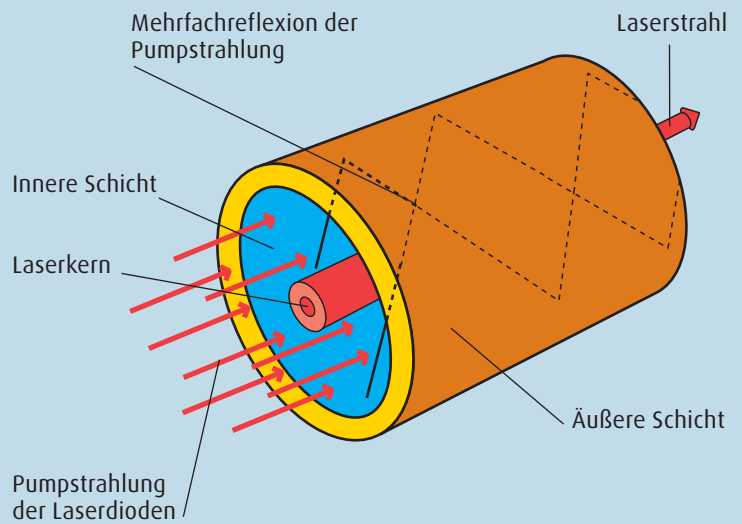


Bild 15: Faserlaser (Faserdurchmesser 260 µm)



7.3 Der Faserlaser

Der Faserlaser besteht aus Laserdioden und optischen Fasern, deren Seelen mit einem laseraktiven Medium dotiert sind. Dieser „Laserkern“ ist umgeben vom „Pumpmantel“, in den das Licht der Laserdiode von einem Ende her eingestrahlt wird. Durch Mehrfachreflexion am äußeren Rand des Pumpmantels wird das Pumplicht wiederholt durch den Laserkern geschickt, wobei das dort befindliche laseraktive Medium angeregt wird und Laserstrahlung emittiert.

Spezielle Stecker an den Faserenden dienen als Endspiegel des „Faserresonators“. Diese verhindern zudem, dass das erzeugte Laserlicht in die Pumpdiode zurückstrahlt, und koppeln einen Teil der Laserstrahlung aus. Die Faser dient somit als Resonator für die Strahlerzeugung und Strahlverstärkung und gleichzeitig als Strahlführungssystem.

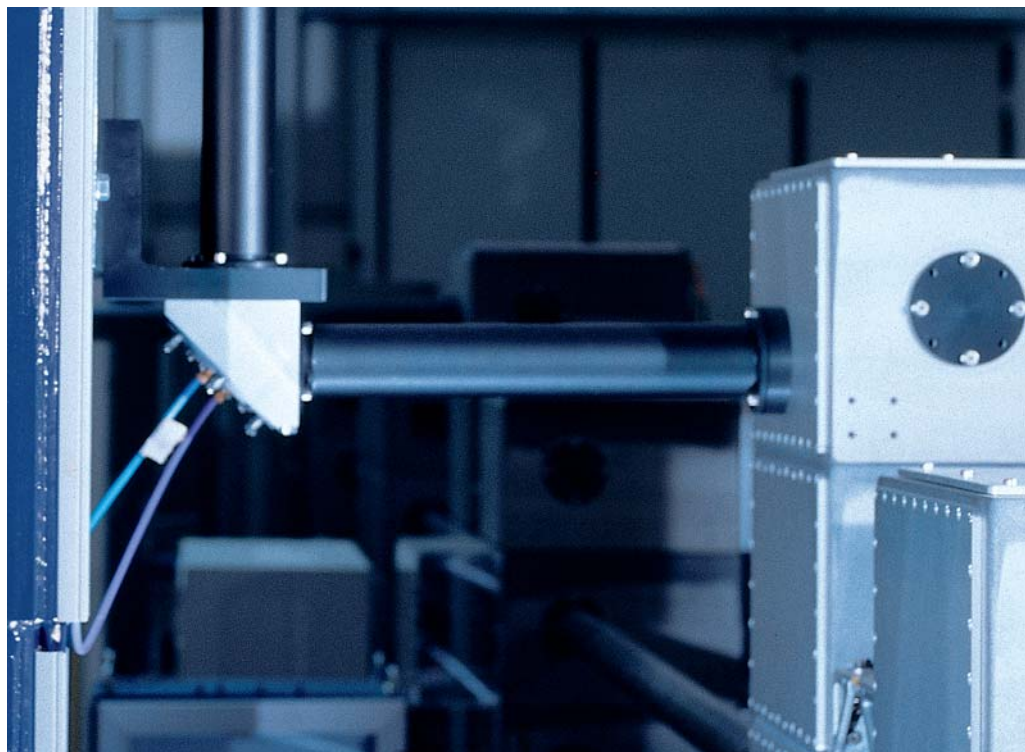
Einzelne Fasern erzeugen Laserstrahlleistungen von bis zu 500 W bei guter Strahlqualität und hohem Wirkungsgrad, weshalb oft auf eine Wasserkühlung verzichtet werden kann. Höhere Laserstrahlleistungen werden durch Bündelung der Fasern erzielt, wobei die Strahlqualität zum Teil allerdings verloren geht.

7.4 Der Excimer-Laser

Der Begriff Excimer ist eine Kurzform von excited dimer (angeregtes 2-atomiges Molekül). Der Excimer-Laser ist auch ein Gaslaser und das laseraktive Medium ein Kunstmolekül aus einem Edelgas (Ar, Kr, Xe) und einem Halogen (F, Cl). Dieses Molekül existiert unter „normalen“ Umständen nicht, kann aber in der elektrischen Entladung geformt werden und lange genug bestehen bleiben, um Laserstrahlung freizusetzen. Fluor oder Wasserstoffchlorid sind als benötigte Laser-gase toxisch und besonders zusammen mit Feuchtigkeit korrosiv und erfordern besondere Maßnahmen bei der Auslegung des Gasversorgungssystems und dem Umgang mit der Abluft. Die Strahlung von Excimer-Lasern wirkt auf die Atomverbindungen des zu bearbeitenden Materials, die aufgebrochen werden und einen Materialabtrag bewirken (so genanntes „kaltes“ Abtragen). Excimer-Laser werden in der Medizintechnik, besonders der Augenheilkunde, oft angewendet. Weitere Anwendungsfelder sind das Strukturieren (Maskentechnik), Reinigen und Schichtentfernen von Oberflächen sowie die Fertigung von Mikrochips mittels Stereolithographie.

8. Strahlführung und -formung.

Die vom Laser erzeugte Laserstrahlung wird über eine mehr oder weniger lange Strecke bis zur Bearbeitungsstelle geleitet. Dabei werden Glasfasern, Spiegel, Teleskope und andere optische Elemente eingesetzt, um den Strahl zu führen und zu formen. Die Handhabung der Werkstücke wird dann oft von einer Bearbeitungsmaschine übernommen.



8.1 Strahlführungssystem

Der Laserstrahl wird durch das so genannte Strahlführungssystem (Strahlweg, Strahlkabinett) vom Laser bis zum Prozess geleitet. Dabei werden unterschiedliche optische Elemente eingesetzt, um die benötigten Strahleigenschaften zu erlangen bzw. zu erhalten. Laserstrahl und optische Elemente sind in der Regel durch eine Einhausung oder einen Balg geschützt, vgl. Bild 16.

Im Strahlführungssystem muss eine spezielle Gasatmosphäre herrschen, die weder die Spiegel noch den Strahl belastet. Die Spiegel sind in der Regel wassergekühlt, sodass evtl. vorhandene Verunreinigungen wie z. B.

Feuchtigkeit oder Kohlenwasserstoffe auf den Spiegeln kondensieren würden und das Reflexionsverhalten der Spiegel verändern könnten.

Der Laserstrahl selbst, insbesondere der des CO_2 -Lasers, wird abhängig von der Intensität im Strahl ebenfalls durch Verunreinigungen beeinträchtigt (z. B. aufgeweitet, „Thermal Blooming“). Der aufgeweitete Strahl kann die Halterungen von Spiegeln und Elemente der Einhausung beschädigen und diese sogar entzünden. Argon, CO_2 , Kohlenwasserstoffe, Feuchtigkeit und elektronegative Gase sind in diesem Zusammenhang zu nennen und müssen besonders bei Laserstrahlung hoher

Bild 16: Strahlführungssystem mit Bearbeitungskopf (Beispiel Laserstrahlschneiden)

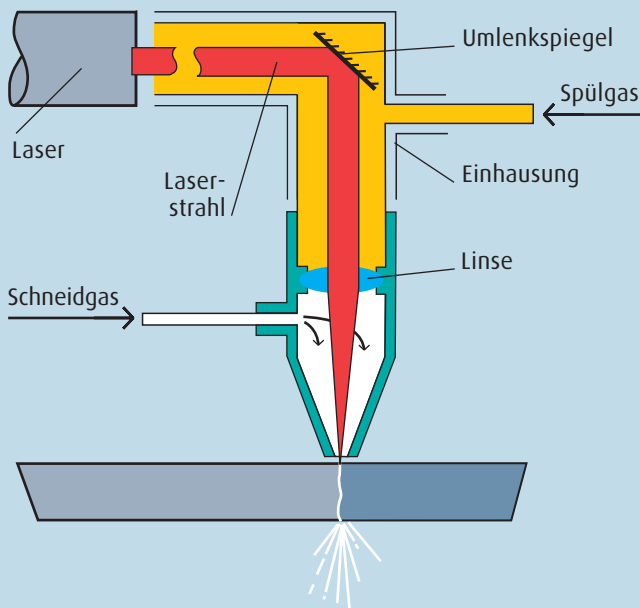
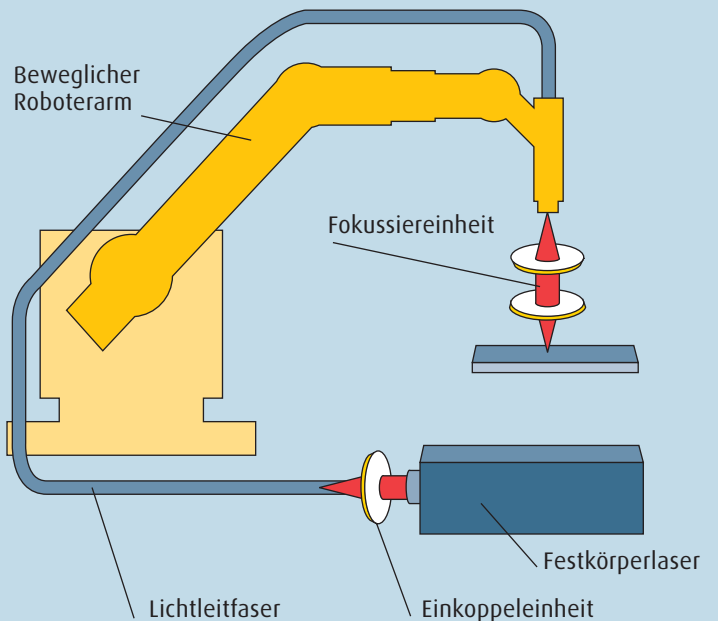


Bild 17: Lichtleitfaser mit Strahleinkopplung und Fokussierung



Qualität und Leistung von mehr als ca. 3 kW ausgeschlossen werden. In diesem Falle ist Stickstoff hoher Reinheit als Spülgas für das Strahlkabinett vorzusehen. Bei geringer Strahlintensität kann Stickstoff von einem Stickstoffgenerator oder auch Druckluft verwendet werden, die jedoch frei von Kohlenwasserstoffverbindungen und Feuchtigkeit sein müssen.

8.2 Lichtleitfaser

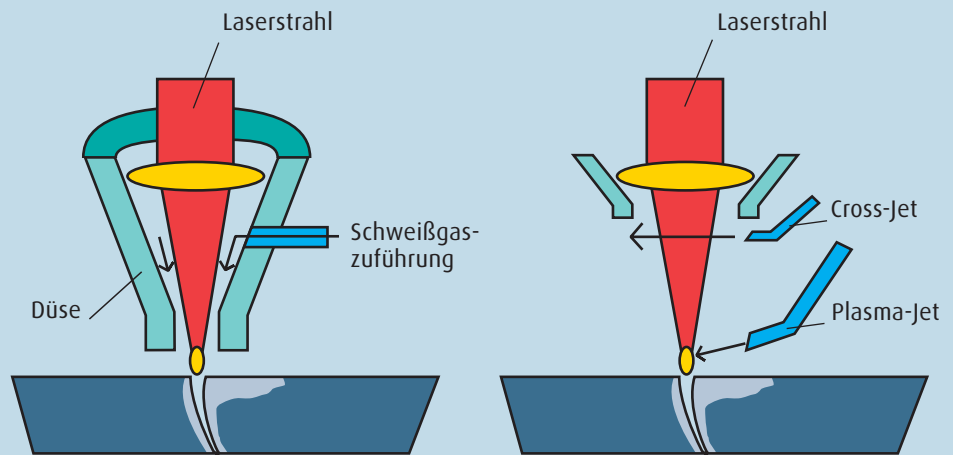
Eine andere Möglichkeit, das Laserlicht vom Laser bis zum Prozess zu leiten, bietet die Lichtleitfaser. Lichtleitfasern sind flexible Glasfasern, die das Laserlicht von YAG- und Faserlasern leiten und z.B. mit einem Roboter geführt werden können, siehe Bild 17. Die Fasern gibt es in unterschiedlichen Durchmessern von weniger als 100 µm bis zu etwa 1.000 µm. In der Faser wird der Laserstrahl vielfach an den Wänden reflektiert und verliert dabei seine geringe Divergenz und gute Fokussierbarkeit.

Als Daumenregel gilt, dass ein Laserstrahl aus einer Lichtleitfaser in einem Brennfleck fokussiert werden kann, dessen Größe mindestens

dem Durchmesser der Faser entspricht. Der Verwendung immer feinerer Fasern sind jedoch Grenzen gesetzt, da der erzeugte Laserstrahl erst einmal in die Faser eingekoppelt werden muss und dabei bestimmte Intensitätswerte nicht überschritten werden können.

Neben der flexiblen Führung der Faser durch ein Handhabungssystem ist die Aufteilung der Laserstrahlung auf mehrere Fasern interessant, wobei die verfügbare Laserstrahlleistung auf einzelne Fasern und Stationen aufgeteilt oder die gesamte Leistung jeweils einer Bearbeitungsstation zugeteilt wird. Es lassen sich auch Laserstrahlen von mehreren Lasern in einer Faser zusammenschalten.

Bild 18: koaxiale Gaszuführung und seitliche Gaszuführung (Plasma-Jet) mit Cross-Jet



8.3 Bearbeitungskopf

Der Laserstrahl wird im Bearbeitungskopf am Ende des Strahlkabinetts oder der Lichtleitfaser mithilfe von Spiegeln oder Linsen fokussiert. Die optischen Elemente im Kopf müssen gegen Verschmutzung wie Rauch und Spritzer geschützt werden. Außerdem ist in vielen Fällen die Zuführung von Prozessgas erforderlich. Dafür werden unterschiedliche Gaszuführungen eingesetzt, die koaxial oder seitlich wirken.

Bei koaxialer Zuführung nehmen Laserstrahl und Gasstrahl den gleichen Weg. Das Gas ist also in intensivem Kontakt mit dem Laserstrahl und kann z. B. ionisiert werden, vgl. Bild 18. Vorteilhaft ist demgegenüber, dass nur ein Gas benötigt wird, das die Optik schützt und als Prozessgas fungiert. Außerdem besteht keine Abhängigkeit von der Vorschubrichtung.

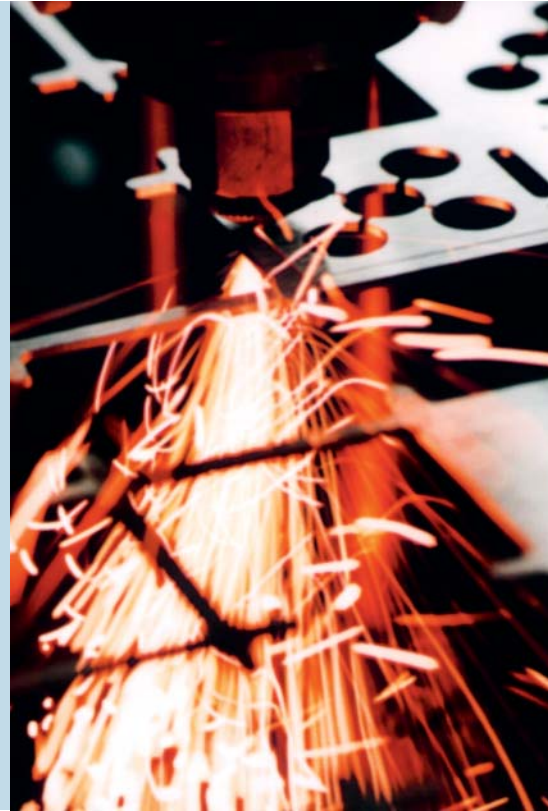
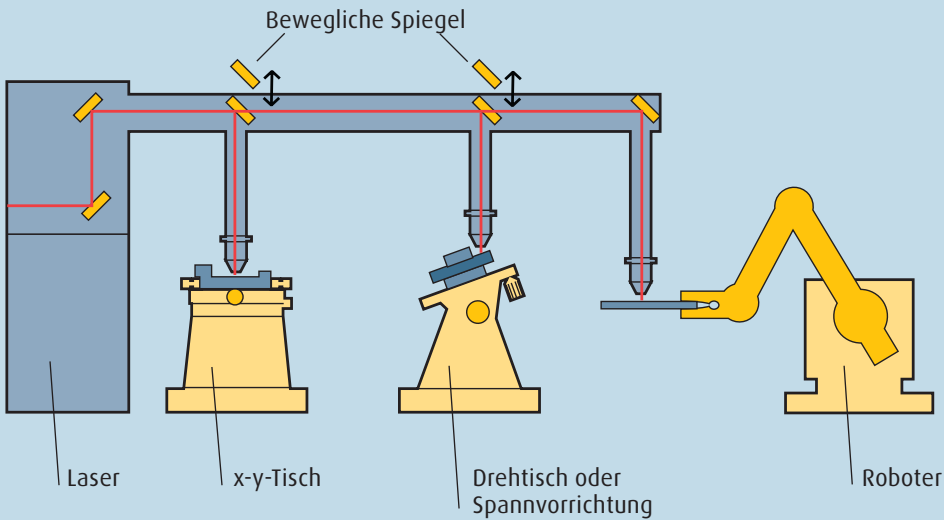
Bei seitlicher Zuführung ist eine zusätzliche Gasdüse, auch Plasma-Jet genannt, seitlich am Bearbeitungskopf angebracht. Das Prozessgas kommt bei dieser Zuführung erst im Prozessbereich in Kontakt mit dem Laserstrahl. Zum Schutz der Optiken muss eine weitere Gasströmung vorgesehen werden. Dazu wird ein scharfer Gasstrahl direkt unterhalb der Optiken platziert. Dieser so genannte Cross-Jet bläst aus dem Schweißbad aufsteigende Dämpfe und Spritzer zur Seite weg, vgl. Bild 18. Der Cross-Jet muss sorgfältig eingestellt sein, um die Schutzwirkung des Prozessgases nicht zu beeinflussen.

Der Plasma-Jet war ursprünglich zur Reduzierung der Plasmabildung entwickelt worden. Ein effektiver Gasschutz des Schweißbereichs wird jedoch mit einer starken punktförmig

ausgerichteten turbulenten Strömung des Plasma-Jets und der damit verbundenen Injektorwirkung und Lufteinwirbelung nicht erzielt. Einen besseren Schutz des Schweißbereichs bieten demgegenüber seitliche Gaszuführungen mit deutlich größerer Düsenöffnung und schwacher laminarer Schutzgasströmung.

Bei der quasiseitlichen Gaszuführung werden mehrere Bohrungen in den Düsenkörper eingebracht und das Schutzgas tritt an der Düsenunterseite aus mehreren Öffnungen aus. Damit kann die Richtungsabhängigkeit überwunden werden. Zur Abwehr von Stäuben und Dämpfen wird zusätzlich in der Regel ein Cross-Jet benötigt.

Bild 19: Mehrstationenbetrieb mit geteiltem Laserstrahl



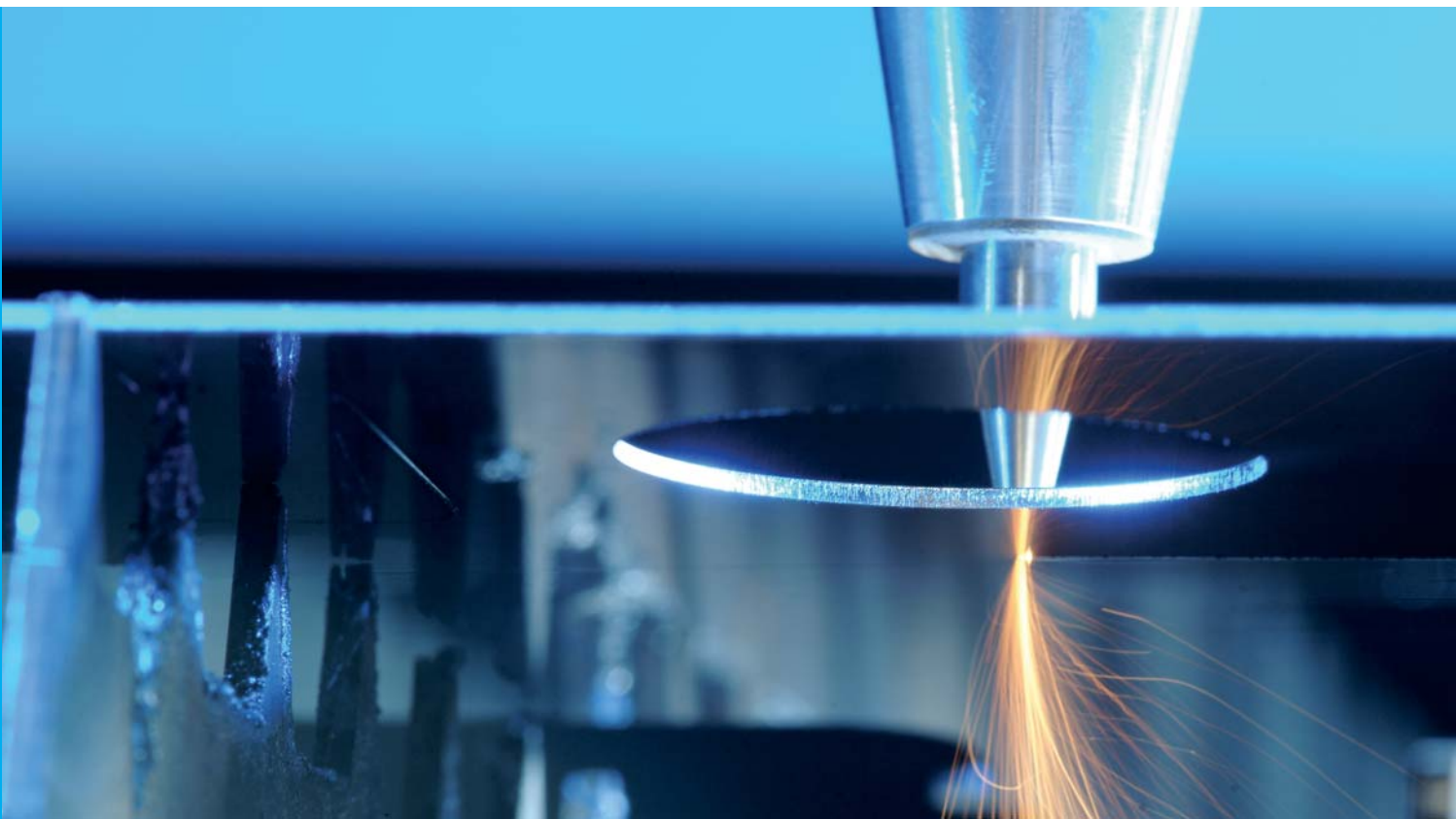
8.4 Werkstückhandhabung

Zum Schneiden, Schweißen oder Oberflächenbehandeln mit dem Laserstrahl muss dieser relativ zum Werkstück bewegt werden. Die Bewegung kann bei sehr kleinen Werkstücken per Hand ausgeführt werden, z.B. in der Schmuckindustrie. Große Werkstücke werden jedoch oft auf einem x-y-Tisch unter dem Laserbearbeitungskopf verfahren, wobei der Kopf die Höhenanpassung übernimmt (z-Achse). Besonders große Werkstücke können auch ortsfest aufgestellt werden

und der Laserstrahl wird in allen Dimensionen verfahren, z.B. in einer Portalanlage. Systeme, bei denen der Bearbeitungskopf alle Bewegungen ausführt, werden dabei „fliegende Optik“ genannt. Bei einer dreidimensionalen Bearbeitung kann das Werkstück fest stehen und der Laserstrahl z.B. mit einem Roboter bewegt werden. Es finden sich aber ebenso Anwendungen, bei denen der Laserstrahl fest steht und das Werkstück bewegt wird. Bei komplexen Werkstücken wird sowohl der Laserstrahl als auch das Werkstück bewegt.

Das Bestücken und Entnehmen einer Laseranlage ist oft zeitaufwendiger als der Laserbearbeitungsprozess selbst. Aus diesem Grund werden gelegentlich mehrere Anlagen von einer Laserstrahlquelle versorgt und der Laserstrahl wird je nach Bedarf auf eine von mehreren Stationen geschaltet, vgl. Bild 19.

9. Laserstrahl-Materialbearbeitung.

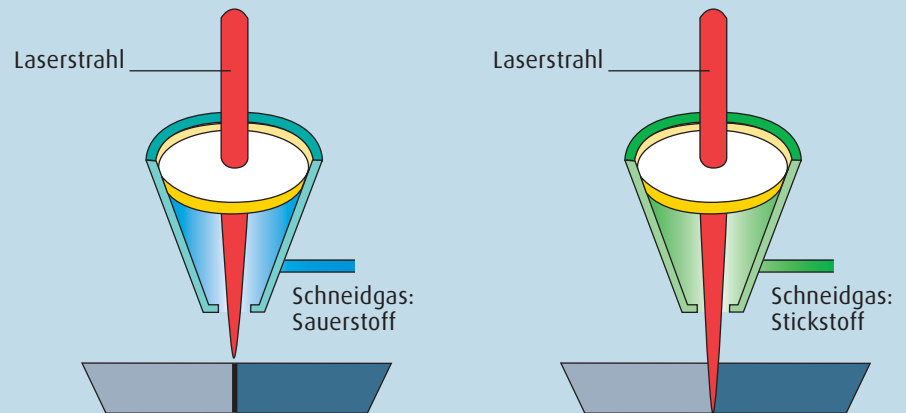


Laserstrahlen werden beim Schneiden, Schweißen und auch bei der Oberflächenbearbeitung wie z.B. beim Härten, Umschmelzen, Abtragen etc. angewendet. Die zum Entzünden, Schmelzen und Verdampfen notwendigen Temperaturen lassen sich erreichen, indem der Laserstrahl mit Linsen oder Spiegeln in einem sehr kleinen Brennfleck fokussiert wird. Dieser Brennfleck wird in unterschiedlicher Höhe relativ zum Werkstück positioniert: beim Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff z.B. an der Werkstückoberseite, beim Laserstrahlschweißen im Werkstück oder beim Laser-

strahlschneiden mit Stickstoff nah an der Werkstückunterseite. Von diesen Anhaltswerten kann jedoch deutlich abgewichen werden, wenn der Werkstoff, die Fertigungsqualität, der Produktionsablauf oder die Strahlqualität eine andere Fokuslage erfordern.

Beim Härten und bei anderen Oberflächenbearbeitungsverfahren kann eine Fokussierung gänzlich unnötig sein, sodass der Laserstrahl, unfokussiert angewendet, eine relativ große Fläche je Arbeitsgang bearbeitet.

Bild 20: prinzipieller Unterschied beim Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff und mit Stickstoff



9.1 Das Laserstrahlschneiden

Prinzipiell wird beim Laserstrahlschneiden zwischen dem Laserstrahl-Brennschneiden mit Sauerstoff und dem Laserstrahl-Schmelzschnitten mit einem nichtreaktiven Gas wie z. B. Stickstoff oder Argon unterschieden. Die Schnittqualität ist dabei außerordentlich hoch (so genannte „Laserqualität“): präzise Konturen, parallele Schnittkanten, geringe Schnittflächenrauheit, keine Anhaftungen (Bart), keine Auskolkungen etc.

Das Laserstrahl-Sublimierschneiden ist eher im Bereich der Nichtmetalle anzusiedeln. Weitere Hinweise und Informationen zum Laserstrahlschneiden finden Sie im Facts About Laserstrahlschneiden.

Laserstrahl-Brennschneiden

Ähnlich dem autogenen Brennschneiden wird der Werkstoff beim Laserstrahl-Brennschneiden durch den Laserstrahl auf Entzündungstemperatur erhitzt und im Sauerstoffstrahl verbrannt, vgl. Bild 20. Infolge der exothermen Reaktion und des zusätzlichen Energieeintrags werden hohe Schneidgeschwindigkeiten im Blechdickenbereich von etwa 1 mm bis über 25 mm erzielt. Das Laserstrahl-Brennschneiden wird hauptsächlich bei un- und niedriglegierten Stählen angewendet. Die Reinheit des eingesetzten Schneidsauerstoffs spiegelt sich dabei unmittelbar in der erzielbaren Schneidgeschwindigkeit wider.

Laserstrahl-Schmelzschnitten

Die zum Schmelzen des Werkstoffs notwendige Energie muss beim Laserstrahl-Schmelzschnitten komplett durch den Laserstrahl bereitgestellt werden. Der nichtreaktive Gasstrahl dient lediglich zum Ausblasen der Schmelze, vgl. Bild 20. Hauptanwendungsbereich ist das Schneiden von rostfreiem Edelstahl im Blechdickenbereich von unter 1 mm bis nahezu 20 mm sowie das Schneiden von sonstigen hochlegierten Stählen und Nichteisenmetallen. Rostfreie Edelstähle werden dabei mit hochreinem Stickstoff geschnitten, der die Rostbeständigkeit erhält. Bestimmte nitridbildende Werkstoffe wie Titan und Zirkon dürfen nur mit Argon geschnitten werden.

Baustahl wird gelegentlich ebenfalls bei deutlich verringerter Schneidgeschwindigkeit mit Stickstoff geschnitten. Hierbei wird die beim Laserstrahl-Brennschneiden entstehende Oxidschicht vermieden. Diese kann z. B. bei einem nachfolgenden Lackier- oder Beschichtungsvorgang störend wirken.

Laserstrahlschneiden mit Luft

Luft wird ebenfalls als Schneidgas hauptsächlich für nichtmetallische Werkstoffe eingesetzt. Beim Schneiden von Metallen ist die erzielbare Schnittqualität generell deutlich schlechter als mit Sauerstoff oder Stickstoff, insbesondere wenn Werkstoffe mit einer Dicke von mehr als ca. 1,5 mm verarbeitet werden. Dazu kommt

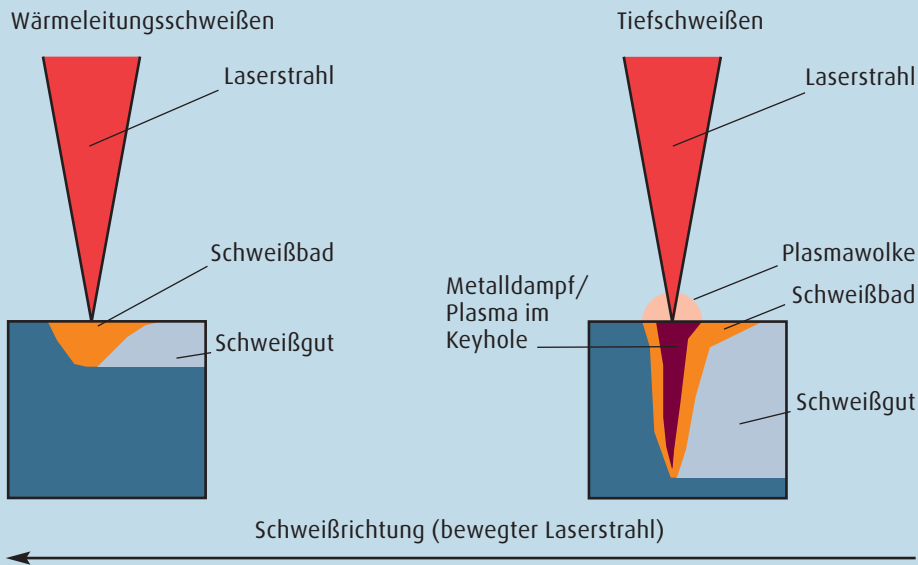
die mögliche Verschmutzung der Fokussieroptik mit Öldämpfen, Feuchtigkeit und Partikeln, die regelmäßig in der Druckluft vorhanden sind. Die Lebensdauer der Optiken wird dadurch erheblich reduziert. Die Zusammensetzung der Druckluft kann zudem je nach Einspeisung variieren und eine Anpassung der Laserparameter erforderlich machen. Dies ist besonders kritisch bei unbeobachteter Fertigung oder mannloser Schicht. Bei einigen Anwendungen kann Luft jedoch eine Alternative darstellen.

In jedem Falle sollte genau abgewogen werden, ob eine ausreichende Schnittqualität erzielt werden kann und zu welchem Preis: Druckluft kann nicht kostenlos erzeugt werden, Optiken haben ihren Preis und Ausfallzeiten sowie Produktionsfehler können sich schnell aufsummieren.

Laserstrahl-Sublimierschneiden

Beim Laserstrahl-Sublimierschneiden wird der Werkstoff spontan verdampft. Dies wird z. B. beim Schneiden von Holz oder Stoff angewendet. Bei der Metallbearbeitung wären sehr hohe Intensitäten notwendig, die nur im Superpuls-Betrieb bereitgestellt werden könnten. Wegen der damit verbundenen geringen Vorschubgeschwindigkeit wird das Verfahren nur in besonderen Fällen angewandt.

Bild 21: prinzipieller Unterschied beim Laserstrahlschweißen ohne Keyhole (Wärmeleitungsschweißen) und mit Keyhole (Tiefschweißen)



9.2 Das Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen sollen in der Regel zwei oder mehrere Werkstoffe verbunden werden. Je nach Werkstückdicke kann dazu eine flache, breite Naht ausreichen, wie sie beim Wärmeleitungsschweißen mit Lasern geringerer Leistung/Intensität erzeugt wird, vgl. Bild 21. Bei ausreichend hoher Intensität im Fokus bildet sich eine Schweißöse, engl. Keyhole, aus, die ein tiefes Eindringen des Laserstrahls (Tiefschweißen) und damit das Verschweißen größerer Werkstückdicken ermöglicht, vgl. Bild 21.

Mit der Ausbildung der Schweißöse ist die Bildung einer Plasmawolke oberhalb der Schweißstelle verbunden, welche die Laserstrahlung absorbieren und ablenken kann. Je höher die vorliegende Intensität der Strahlung und die Dichte der Plasmawolke ist, desto stärker ist die Absorption und Ablenkung der Laserstrahlung durch die Plasmawolke.

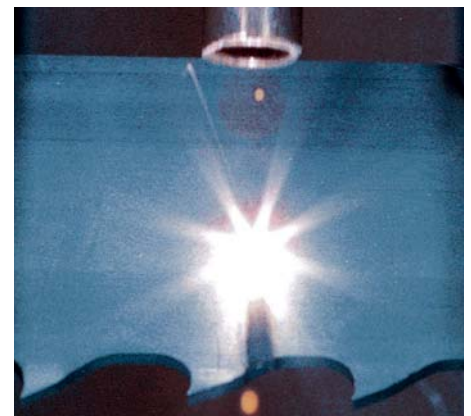
Die Dichte der Plasmawolke lässt sich durch das Schweißgas beeinflussen, wobei Helium eine Reduktion der Plasmawolke bewirkt, Argon dagegen eine Ausdehnung der Plasmawolke verursachen kann. Eine weitere Aufgabe des Schweißgases ist der Schutz des Schweiß-

bereichs. Das schwere und inerte Argon gewährleistet dabei eine gute Verdrängung der Luft aus dem Schweißbereich (Wannenlage). Helium ist demgegenüber ein sehr leichtes, inertes Gas, das sich leicht verflüchtigt. Um beide Anforderungen an das Schweißgas zu erfüllen, eine gute Nahtabdeckung sowie eine Reduktion des Plasmas, werden bei hoher Laserstrahlleistung und Intensität beide Gase als Schweißgasgemisch eingesetzt (bei CO₂-Lasern ab ca. 3 kW). Weitere Hinweise und Informationen zum Laserstrahlschweißen finden Sie im Facts About Laserstrahlschweißen.

9.3 Die Oberflächenbehandlung mit Lasern

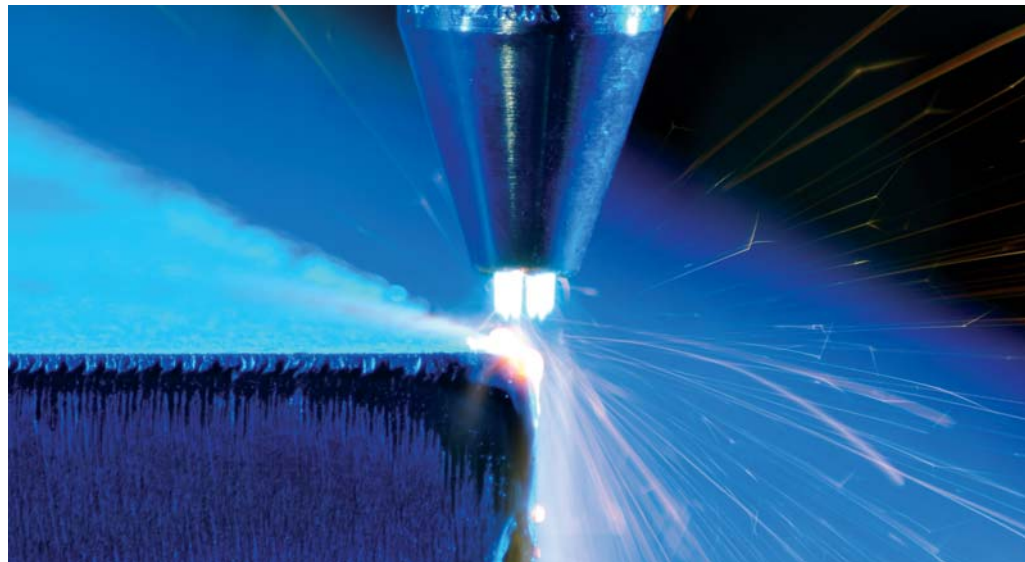
Bei der Oberflächenbearbeitung lassen sich mehrere Prozesse unterscheiden wie z. B. das Laserstrahl-Umwandlungshärten, das Modifizieren von Oberflächen, das Laserstrahllegieren und das Laserstrahlbeschichten. Mit dem Umwandlungshärten lassen sich harte Schichten in genau definierter Breite und Tiefe erzeugen. Das Modifizieren von Oberflächen kann z. B. Umschmelzen oder Anlassen bedeuten.

Beim Legieren werden gasförmige oder feste Stoffe in die Oberfläche eingebracht, um die Eigenschaften der Randschicht gezielt zu verändern, und beim Beschichten wird eine Schicht auf ein Werkstück aufgebracht, um die Korrosionsbeständigkeit oder Verschleißfestigkeit zu erhöhen. Als Schutzgas bei diesen Prozessen findet meist Argon Anwendung, da oft mit unfokussiertem oder defokussiertem Strahl geringer Intensität gearbeitet wird. Weitere Hinweise und Informationen zur Oberflächenbehandlung mit Lasern finden Sie im Facts About Laserstrahlschweißen.



10. Die Laserstrahlverfahren im Wettbewerb mit anderen Verfahren.

Die Lasertechnik ist eine relativ neue Technologie, die gegenüber bestehenden Technologien Vorteile aufweist wie z. B. die Präzision der Leistungssteuerung und des Energieeintrags. Dem gegenüber stehen die Investitionskosten für eine Laserstrahlbearbeitungsmaschine und die daraus resultierende notwendige hohe Auslastung. Eine Laseranlage ist nicht das Universalwerkzeug, das alle Aufgaben in einem Unternehmen wirtschaftlich lösen kann. Nach wie vor sollte genau ermittelt werden, welche Produktionsqualität gefordert wird und wie diese am wirtschaftlichsten zu erzielen ist. Die Lasertechnik ist dabei sicher eine von mehreren Optionen.



10.1 Thermisches und mechanisches Trennen

In der Fertigungsindustrie wird schwerpunktmäßig Baustahl in einem Blechdickenbereich von bis zu 10 mm verarbeitet. Dazu stehen die thermischen Trennverfahren autogenes Brennschneiden, Plasmaschneiden und Laserstrahlschneiden sowie die mechanischen Verfahren Stanzen, Nibbeln, Scheren und Wasserstrahlschneiden zur Verfügung. Im Blechdickenbereich bis zu 15 mm und darüber kann der Laser mit seinen besonderen Vorteilen wie Schneidgeschwindigkeit, Schnittqualität und verschleißlosem Werkzeug besonders glänzen. Er kann sich damit gegenüber

allen Verfahren, auch dem Plasmaschneiden mit dem Schwerpunkt Edelstahlverarbeitung, gut platzieren. Beim Stanzen wird für jedes Konturelement ein besonderes Werkzeug benötigt, was erst bei größeren Serien wirtschaftlich ist. Hier bietet der Laser als Ein- oder Zweikopfanlage eine wesentlich höhere Flexibilität, sodass das Stanzen zunehmend vom Markt verdrängt wird.

Bei der Entscheidung für eine Laseranlage wird oftmals nicht nur der Schneidprozess an sich betrachtet, sondern die gesamte Fertigungskette. Eine Laseranlage kann dabei z. B. Vor- und Nacharbeit reduzieren, aber auch weitere

Fertigungsschritte zum Teil überflüssig machen oder dank filigraner Strukturen und präziser Konturen ganz neue Perspektiven schaffen. Weltweit mehr als 30.000 installierte Systeme sprechen hierzu eine deutliche Sprache.

Bei den Vorüberlegungen für oder wider eine Laseranlage sollte auch die Auslastung und Bestückung kritisch hinterfragt werden. Eine sichere Mindestauslastung sollte grundsätzlich gewährleistet sein und die Bestückung je nach Teilespektrum mehr oder weniger automatisiert erfolgen, um eine hohe effektive Bearbeitungszeit durch den Laser zu ermöglichen.

10.2 Schweißen

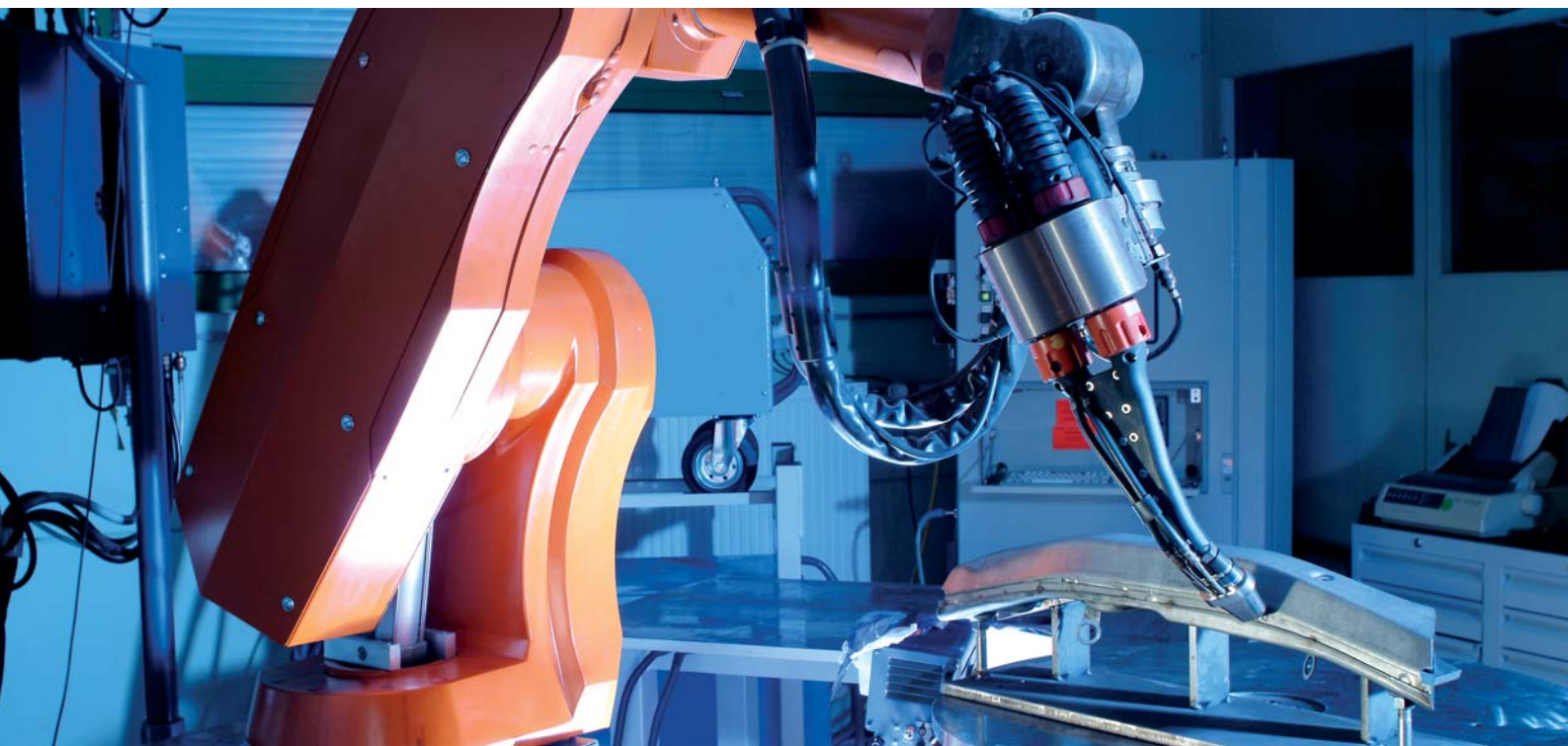
Beim Fügen von Werkstoffen wären noch wesentlich mehr Verfahren aufzuzählen als beim Schneiden. Der Laser konkurriert jedoch schwerpunktmäßig mit mechanisierbaren schweißtechnischen Verfahren wie dem MIG-, MAG-, WIG-, Plasma- und Elektronenstrahlschweißen. Das Schweißen mit der Flamme soll hier nur außer Konkurrenz genannt werden. Beim Fügen gibt es eine Vielzahl von interessanten Laseranwendungen, von einem Durchbruch wie beim Schneiden kann jedoch noch nicht die Rede sein.

Dabei steht sich der Laser teilweise selbst im Weg: Der filigrane Energiestrahл erfordert eine sehr genaue Nahtvorbereitung, übliche Fügspalte würde er ohne Energieübertragung passieren.

Lösungen hierzu sind präzise Nahtvorbereitung (quasi Nullspalt) und aufwendige Spanntechnik, aber auch die Kombination von Laser- und Schutzgasschweißen im so genannten Hybridprozess. Das Schutzgasverfahren gewährleistet dabei die Nahtflankenerfassung und liefert den Zusatzwerkstoff. Der Laser ermöglicht den tiefen Einbrand und die hohe Schweißgeschwindigkeit. Diese ist erheblich höher als mit dem Schutzgasschweißen allein.

Bestehende Regelwerke und Überzeugungen sind ein weiteres Hindernis auf dem Weg des Lasers zum universellen Schweißwerkzeug. So verursacht der präzise Energiestrahл bei hoher Schweißgeschwindigkeit und entsprechender Abkühlrate hohe Härten. Diese finden sich aber in einem erheblich schmaleren Saum als bei den klassischen Schweißver-

fahren, sodass bestehende Grenzwerte überdacht werden müssen. ZTU-Umwandlungsschaubilder und mechanisch-technologische Prüfverfahren sind auf Abkühlraten und Nahtbreiten klassischer Schweißverfahren abgestimmt und kaum auf Laserstrahlnähte anzuwenden. Es gibt aber auch gänzlich neue Anwendungen, die durch den Laser erst ermöglicht wurden, wie das Schweißen von Tailored Blanks. Diese zusammengestückelten Tafeln aus Blechen unterschiedlicher Materialdicke und Beschaffenheit werden nach dem Laserstrahlschweißen z. B. zu einer PKW-Tür verformt. Dabei werden, wo es möglich ist, Bleche zur Gewichtseinsparung mit dicken Blechen zur Kraftübertragung kombiniert. Kein anderes Verfahren ermöglicht eine entsprechende Produktivität und Verformbarkeit der Nähte.



11. Sicherheitshinweise.

Laseranlagen beinhalten Gefahrenpotenziale wie die Laserstrahlung, die elektrische Stromversorgung und Emissionen, die bei der Lasermaterialbearbeitung entstehen. Diese erfordern besondere Sorgfalt und entsprechende Absaugungen. Für die Gasversorgung werden in der Regel Gasflaschen, Flaschenbündel und Tanks eingesetzt. Auch hier sind ein umsichtiger Umgang und entsprechende Maßnahmen zur Unfallverhütung notwendig.

11.1 Laserstrahlung

Laser, die für die Materialbearbeitung eingesetzt werden, strahlen im infraroten oder ultravioletten Spektrum und sind damit für das menschliche Auge nicht sichtbar, vgl. Bild 22. Zum Einrichten einer Laserstrahlbearbeitungsmaschine wird deswegen ein HeNe-Laser oder eine Laserdiode, beides Laser geringerer Leistung, die im sichtbaren Spektrum strahlen, in den Strahlengang geschaltet.

Das intensive Laserlicht der Materialbearbeitungslaser ist besonders für das Auge gefährlich. CO₂-Laserstrahlung wird von der Hornhaut absorbiert. YAG- und Faserlaserstrahlung dringt bis zur Netzhaut durch. Diese wird bereits durch relativ wenig Strahlung unwiederbringlich zerstört. Fehlgeleitete Laserstrahlung kann direkt vom Laser kommen und durch Fehlschaltung, geöffnete Abdeckung, verschobene Spiegel etc. die Augen bedrohen.

Weitere Gefahren sind Verbrennungen der Haut oder die Entzündung von feuergefährlichen Materialien durch fehlgeleitete Laserstrahlung.

Die größte Gefahr geht jedoch regelmäßig von reflektierter Laserstrahlung aus. Zur Erinnerung: Der größte Teil der Laserstrahlung wird vom kalten Werkstoff erst einmal reflektiert (vgl. Bild 8). Dazu kommen Reflexionen von Werkstoffkanten, infolge Schmelzbadturbulenzen usw.

Die Fehlstrahlung und die Reflexionen müssen abgeblockt werden. Dazu schreibt der Gesetzgeber die Einhausung von Laserstrahl und Arbeitsbereich vor. Zusätzlich sollten Anwesende und besonders Maschinenbediener Schutzbrillen tragen, die auf die Strahlung der verwendeten Laser abgestimmt sind.

YAG- und Faserlaserstrahlung ist ungleich gefährlicher für die Augen und erfordert besondere Schutzmaßnahmen und zugelassene Schutzbrillen. Standard-Sicherheitsbrillen aus Glas oder Plexiglas sind vollkommen ungeeignet, da Glas und Plexiglas die YAG- und Faserlaserstrahlung passieren lassen.

11.2 Elektrische Energieversorgung

Laseranlagen enthalten stromführende Komponenten und Aggregate. Wird das Gehäuse des Lasers geöffnet, ohne die Stromzufuhr zu unterbrechen, drohen Verbrennungen, Schock oder Tod durch Stromschlag. Service und Wartung der Laser dürfen deswegen nur durch autorisiertes Personal erfolgen.

11.3 Schneid- und Schweißemissionen

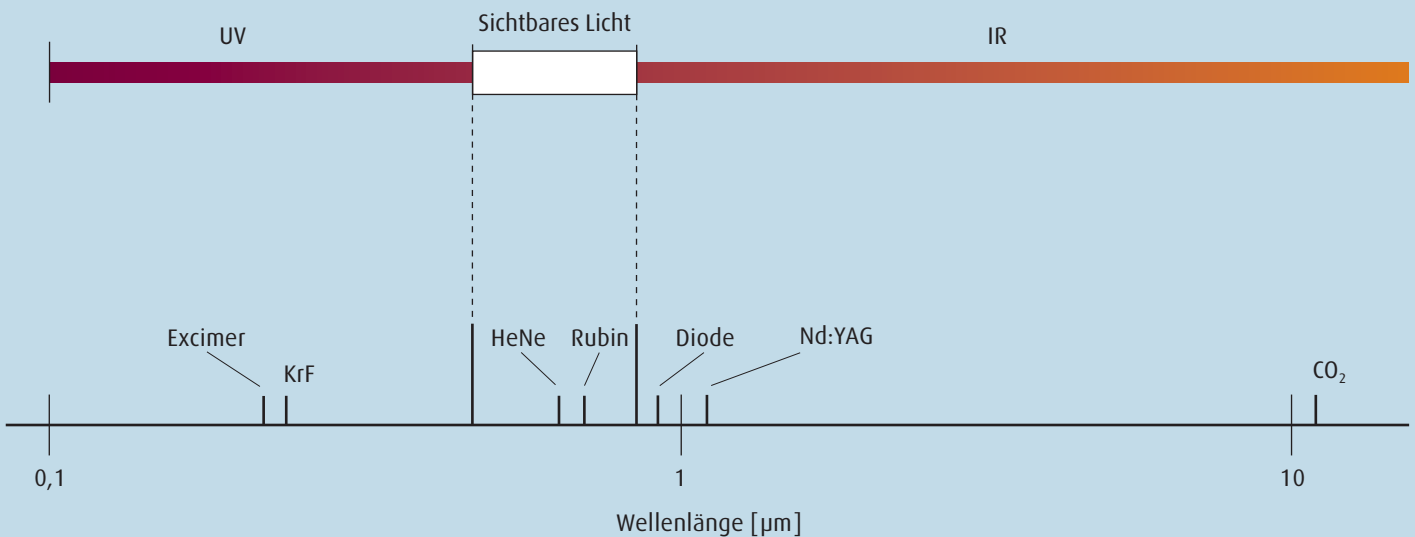
Beim Laserstrahlschweißen und besonders beim Laserstrahlschneiden können materialabhängig gesundheitsschädliche Stäube und Rauch entstehen. Eine Absaugung des Arbeitsbereichs ist deswegen generell vorzusehen. Eine ausreichende Frischluftzufuhr muss gewährleistet sein. Das Schneiden von Kunststoffen ist dabei besonders kritisch, da korrosive und toxische Gase entstehen können. Diese müssen abgesaugt und nach außerhalb des Gebäudes geleitet werden. Werden Kunststoffe und Metalle auf einer Anlage laserstrahlgeschnitten, müssen bei jedem Materialwechsel die Filter der Absaugung ausgetauscht und die Absaugung gereinigt werden, um Verpuffungen zu vermeiden.

11.4 Gase und Gasversorgung

Gase für die Lasermaterialbearbeitung werden gasförmig in Flaschen und Flaschenbündeln oder flüssig in Tankanlagen bereitgestellt.

Flaschen oder Flaschenbündel dürfen nur in ausreichend gelüfteten Räumen gelagert bzw. benutzt werden. Flaschen sind gegen Umfallen zu sichern.

Bild 22: Spektralbereiche des Lichts und verschiedener Laser



Bei der Entnahme der Gase aus Flasche oder Flaschenbündel muss der Druck auf den Arbeitsdruck reduziert werden. Hierzu sind zur Gasart und Gasreinheit passende Druckminderer vorzusehen. Flaschen und Flaschenbündel müssen vorsichtig geöffnet werden, um eine Beschädigung der Druckminderer und nachfolgender Installationen durch einen Druckstoß zu vermeiden. Bei Arbeitsende sind die Flaschen wieder zu schließen und die Druckminderer zu entlasten. Anschluss und Austausch der Druckregler dürfen nur durch autorisiertes Personal erfolgen. Sicherheitseinrichtungen dürfen nicht verstellt werden.

Die meisten Gase, die bei der Lasermaterialbearbeitung eingesetzt werden, sind in der Atemluft enthalten. Gleichwohl darf die Sauerstoffkonzentration in der Umgebungsluft nicht verändert werden.

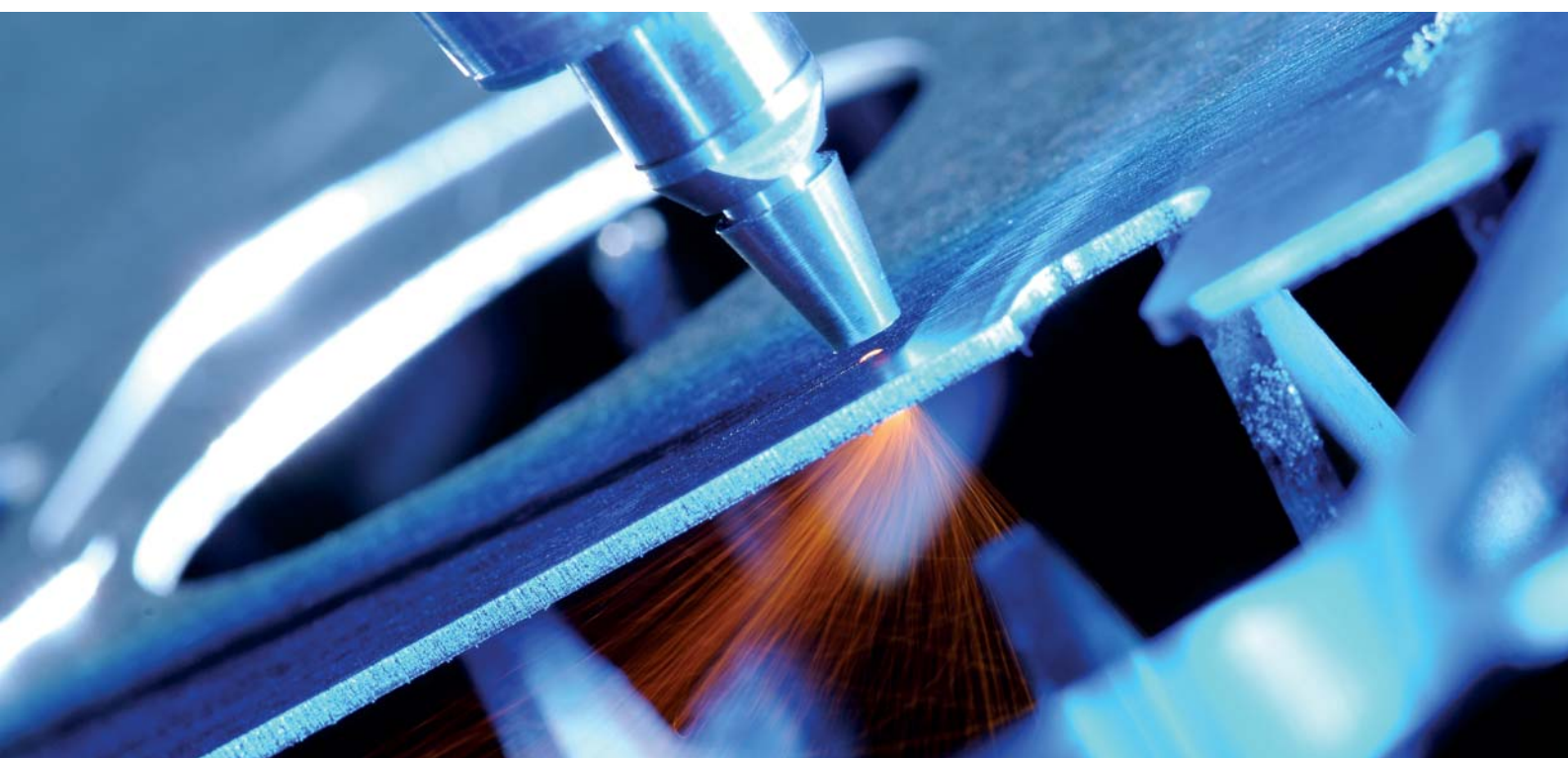
Beim Laserstrahlschneiden mit Stickstoff werden große Mengen an Stickstoff benötigt. Hierdurch kann die Sauerstoffkonzentration so weit verringert werden, dass es zu Ohnmacht bis hin zum Tod durch Ersticken kommt. Aber auch beim Laserstrahlschneiden mit Sauerstoff darf es zu keiner Sauerstoffanreicherung kommen. Diese führt zu einer erhöhten Explosionsgefahr.

Eine Absaugung der Schneidgase ins Freie und ausreichende Frischluftzufuhr müssen vorgesehen sein.

Auf Kohlendioxid muss aufgrund seiner sehr hohen Dichte ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Es kann sich in Senken und Kellerräumen ansammeln und dann den Atemsauerstoff verdrängen. Wird Kohlendioxid als Prozessgas eingesetzt, ist demzufolge auf eine effektive Absaugung bzw. gute Ventilation zu achten.

Weitere und ausführlichere Sicherheitshinweise zu Gasen und zur Gasversorgung erhalten Sie von Ihrem Vertriebszentrum der Linde AG.

12. Literatur.



Mit dem Linde LASERLINE® Programm bieten wir unseren Kunden eine Komplettlösung, bestehend aus optimierten Gasen, einem maßgeschneiderten Gasversorgungssystem und einem umfassenden Service.

**Weitere Schriften der „Facts About“-Serie:
Wissenswertes für den Praktiker**

Facts About: Laserstrahlschneiden.

J. Berkmanns, M. Faerber

Facts About: Laserstrahlschweißen.

J. Berkmanns, M. Faerber

Facts About: Laser in der Materialbearbeitung:
Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

J. Scholz

Autoren:

Dr.-Ing. J. Berkmanns, Linde Gas LLC,
Cleveland, USA

Dr.-Ing. M. Faerber, Linde AG, Geschäfts-
bereich Linde Gas, Unterschleißheim,
Deutschland

Bildnachweis:

Bild auf Seite 16:
IFSW, Stuttgart

Vorsprung durch Innovation.

Linde Gas ist mehr. Linde Gas übernimmt mit zukunftsweisenden Produkt- und Gasversorgungskonzepten eine Vorreiterrolle im globalen Markt. Als Technologieführer ist es unsere Aufgabe, immer wieder neue Maßstäbe zu setzen. Angetrieben durch unseren Unternehmergeist arbeiten wir konsequent an neuen hochqualitativen Produkten und innovativen Verfahren.

Linde Gas bietet mehr – wir bieten Mehrwert, spürbare Wettbewerbsvorteile und erhöhte Profitabilität. Jedes Konzept wird exakt auf die Bedürfnisse unserer Kunden abgestimmt. Individuell und maßgeschneidert. Das gilt für alle Branchen und für jede Unternehmensgröße.

Wer heute mit der Konkurrenz von morgen mithalten will, braucht einen Partner an seiner Seite, für den höchste Qualität, Prozessoptimierungen und Produktivitätssteigerungen tägliche Werkzeuge für optimale Kundenlösungen sind. Partnerschaft bedeutet für uns jedoch nicht nur wir für Sie – sondern vor allem wir mit Ihnen. Denn in der Kooperation liegt die Kraft wirtschaftlichen Erfolgs.

Linde Gas – ideas become solutions.

Für Sie einheitlich erreichbar – bundesweit in Ihrer Nähe.

Vertriebszentren/Kundenservice allgemein

Berlin	Düsseldorf	Hamburg	Hannover	Köln
Leuna	Mainz	München	Nürnberg	Stuttgart

Telefon 018 03.850 00-0*

Telefax 018 03.850 00-1*

Getränkeindustrie und -handel

Telefon 018 03.850 00-250*

Telefax 018 03.850 00-251*

* 0,09 € pro Minute aus dem Festnetz. Zur Sicherstellung eines hohen Niveaus der Kundenbetreuung werden Daten unserer Kunden wie z.B. Telefonnummern elektronisch gespeichert und verarbeitet.



Linde AG
Geschäftsbereich Linde Gas, Seitnerstraße 70, 82049 Höllriegelskreuth
Telefon 089.74 46-0, Telefax 089.74 46-12 16, www.linde-gas.de

